

Proyecto Fin de Carrera

CARACTERIZACIÓN MATRICIAL DE LAS CURVATURAS EN FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO

Autora:

MARÍA ANDRÉS GAMUNDI

Directora:

MARÍA ÁNGELES LOSADA BINUÉ

Ingeniería de Telecomunicaciones
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Zaragoza, noviembre de 2015

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mis padres, les debo todo. Gracias a ellos y su esfuerzo, cada día soy mejor persona y voy dando pasos hacia delante. A los que ya no están, siempre en el corazón y en el pensamiento.

A mi hermana, por aguantar juntas épocas de nervios, risas y lloros. Por eso y mucho más, es una parte de mí.

A Javier, por apoyarme y confiar en mí siempre. Por sufrir los tropiezos y disfrutar los logros conmigo. Por ser mi compañero de viaje.

A los amig@s que siempre han estado cerca a pesar de la distancia, por su apoyo, en especial a mis "freaks", sin los ratos de biblioteca, nervios, risas, canciones, encuentros y viajes no hubiera sido lo mismo.

A M^a Ángeles, por todo lo aprendido de ella este año, por sus consejos y ánimos. También al grupo de POF, por la confianza y la oportunidad brindada para aprender más, y cómo no, por los buenos ratos que hemos pasado juntos.

¡GRACIAS A TOD@S!

CARACTERIZACIÓN MATRICIAL DE LAS CURVATURAS EN FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO

RESUMEN

La fibra de plástico está siendo cada vez más utilizada como medio de transmisión en entornos de corto alcance como son automoción, aeronáutica y redes domésticas debido a la ventaja que suponen los bajos costes de componentes, instalación y mantenimiento. Además, su mayor atenuación y su menor ancho de banda respecto a las fibras de vidrio, son asumibles en este tipo de redes cuyos requerimientos no son muy altos. Para consolidar la implantación de la POF (*Plastic Optical Fiber*) en redes de comunicaciones de corto alcance es necesario un modelo fiable que describa la propagación de la luz en la fibra y que sea fácilmente integrable en entornos de simulación de redes ópticas. En esta línea, el grupo de POF de la Universidad de Zaragoza ha desarrollado un modelo matricial para esta fibra y varios componentes que se está integrando actualmente en plataformas de software comercial. En los ámbitos de aplicación de la POF son frecuentes las esquinas y rincones, y en su instalación es necesario someter a la fibra a diversas curvaturas que modifican la distribución de potencia transmitida. Así pues, para completar el modelo de POF se requiere un modelo que permita caracterizar los cambios introducidos por dichas curvaturas.

El objetivo central de este proyecto es la obtención de las matrices características para curvaturas de 90° (*esquinas*) y 360° (*bucles*) de diámetros comparables al tamaño de la fibra. Para ello, en primer lugar ha sido necesario diseñar una metodología experimental adecuada modificando el método aplicado para caracterizar otros dispositivos de fibra de plástico. Dicho método se basa en la obtención de barridos de patrones de campo lejano (*FFP, Far Field Pattern*) para distintos ángulos de inyección. Los barridos se obtienen primero para una fibra corta sin perturbaciones (referencia) y después para la fibra con la curvatura a caracterizar. Mediante la comparación de las medidas con y sin curvatura, se obtienen las funciones angulares de atenuación y difusión que introduce dicha curvatura y que permiten el cálculo de su matriz característica. Las predicciones obtenidas con estas matrices características se han validado comparándolas con datos experimentales. Además, se han estudiado los efectos de la permanencia de las curvaturas.

Por último, se ha desarrollado un modelo analítico que permite simular los efectos de las curvaturas para cualquier diámetro dentro del rango caracterizado experimentalmente. Este modelo analítico ha facilitado la inclusión de un bloque de curvaturas en la herramienta de simulación de POF desarrollada en el grupo, que se ha aplicado para realizar un análisis preliminar de su impacto en redes de comunicaciones de corta distancia.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo del proyecto	1
1.2. Contenidos de la memoria.....	2
Capítulo 2: METODOLOGÍA DE TRABAJO	4
2.1. Sistema experimental de obtención de barridos de FFP	4
2.2. Protocolo de medida	6
2.2.1 Registro de barridos de FFPs con y sin curvatura	6
2.2.2 Obtención de los parámetros del modelo.....	8
2.3. Influencia del sentido de giro de la curvatura.....	12
2.3.1 Atenuación	12
2.3.2 Difusión	13
2.4. Promediado final	14
Capítulo 3: MODELO MATRICIAL DE CURVATURAS.....	16
3.1 Cálculo de las matrices características	16
3.1.1 Funciones de atenuación angular	16
3.1.2 Parámetros de difusión	17
3.1.3 Matrices de curvaturas	17
3.2 Comparación con otros elementos	19
3.3 Validación experimental	20
3.3.1 Perfiles de campo lejano	20
3.3.2 Pérdidas en función del diámetro.....	21
3.4 Efectos de la permanencia de las curvaturas.....	22
3.5 Caracterización de curvaturas en entornos realistas	25
Capítulo 4: MODELO ANALÍTICO Y SIMULACIÓN EN ENTORNO REAL	27
4.1 Modelo analítico de la matriz de curvaturas	27
4.1.1 Parametrización de la atenuación y difusión en función del diámetro de curvatura	27
4.1.2 Matrices características	30

4.2	Efectos de las curvaturas en un enlace de fibra óptica	31
Capítulo 5: CONCLUSIONES		35
5.1	Aportaciones del PFC y valoración del trabajo.....	35
5.2	Continuación y ampliación del trabajo	36
Bibliografía y Referencias		37
Anexo I: FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO		43
I.1.	Materiales utilizados en su fabricación	44
I.2.	Clasificación de las fibras de plástico.....	44
I.3.	Características geométricas de la fibra óptica de plástico de salto de índice.....	46
I.4.	Atenuación	47
I.5.	Dispersión y ancho de banda	49
Anexo II: PROCESO DE PREPARACIÓN DE LA FIBRA.....		51
Anexo III: MODELO MATRICIAL DE PROPAGACIÓN DE POTENCIA ÓPTICA EN POFS.....		53
Anexo IV: ENTORNO DE MEDIDA DE FFPS (LabVIEW™)		57
Anexo V: PROGRAMAS DESARROLLADOS EN EL PROYECTO (Matlab™)		60
V.1.	Procesado de los datos experimentales de perfiles radiales.....	60
V.2.	Obtención de las funciones y matrices características.....	60
V.3.	Funciones del modelo de propagación.....	60
V.4.	Modelo analítico.....	61
V.5.	Programas incorporados a la ToolBox de POF	61
Anexo VI: MANUALES Y HOJAS DE CARACTERÍSTICAS.....		63
VI.1.	Manual de la ToolBox de POF en Matlab™	64
VI.2.	Fibra Eska™ Mitsubishi GH-4001	68
VI.3.	Cámara QICAM FAST 1394.....	69
VI.4.	Medidor de potencias FOTEC.....	71
Anexo VII: ARTÍCULO POF2015.....		73
Anexo VIII: DIAGRAMA DE GANTT		78

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 2.1 Sistema experimental de registro de FFPs, configuraciones de 360° y 90° y torre de curvaturas.....	5
Figura 2.2 Matriz de perfiles radiales para una fibra GH de 2 m.....	6
Figura 2.3 Matrices de barridos de FFP para la referencia y curvaturas de 5 y 1.2 cm de diámetro. En la parte superior se representan las imágenes para 360° y en la inferior para 90°.....	8
Figura 2.4 Función de atenuación para curvatura de 360° y 90° con diámetro 1.2 cm.....	10
Figura 2.5 Cuadrante positivo de las matrices de FFP para curvatura 360°-1.2 cm: experimental (izquierda) y simulado (derecha).....	11
Figura 2.6 Configuración de las curvaturas de 360° y 90° para signo positivo y negativo.....	12
Figura 2.7 Atenuaciones curvaturas 360° y 90° para ambos sentidos.....	13
Figura 2.8 Difusiones para ambos sentidos de giro para curvaturas de 360° (izquierda) y 90° (derecha).....	13
Figura 2.9 Atenuación y difusión características para curvaturas de 360° y 90° con diámetro 2.6 cm. Medidas y promedio con desviación estándar.....	14
Figura 3.1 Atenuaciones promedio definitivas para las curvaturas estudiadas.....	16
Figura 3.2 Difusiones promedio definitivas para las curvaturas estudiadas.....	17
Figura 3.3 Matrices características para las curvaturas de 90° y 360°.....	18
Figura 3.4 Atenuaciones y difusiones promedio para las curvaturas, fibra GH y conector.....	19
Figura 3.5 Comparación de matrices características para las curvaturas, fibra GH y conector.....	20
Figura 3.6 Potencias caso curvatura 360° y diámetro 1.2 cm.....	21
Figura 3.7 Pérdidas de potencia curvaturas 360°.....	22
Figura 3.8 Atenuaciones para las curvaturas de 360° y 90°, diámetro 0.6 cm y permanencia.....	23
Figura 3.9 Difusiones para las curvaturas de 360° y 90°, diámetro 0.6 cm y permanencia.....	23
Figura 3.10 Atenuaciones estirando después de las medidas de curvaturas.....	24
Figura 3.11 Fotografías de la instalación de esquinas interna y externa.....	25

Figura 3.12 Atenuaciones y difusiones para las curvaturas estudiadas y las esquinas.....	26
Figura 4.1 Niveles, ángulos de corte y pendientes con curvas de ajuste de las curvaturas 360° y 90°.	28
Tabla 4.1 Valores de los parámetros de las funciones de nivel para 360° y 90°.	29
Tabla 4.2 Valores de los parámetros de las funciones de los ángulos de corte para 360° y 90°.	29
Tabla 4.3 Valores de los parámetros de las funciones de la pendiente para 360° y 90°.	29
Figura 4.2 Atenuaciones y difusiones para x diámetros diferentes.....	29
Tabla 4.4 Valores de los parámetros de las funciones de difusión para 360° y 90°.	30
Figura 4.3 Difusiones con las curvas de ajuste para las dos curvaturas.....	30
Figura 4.4 Matrices características para curvaturas de 90° y 360°.....	31
Figura 4.5 Esquemas de red de fibra óptica de plástico con curvaturas.....	32
Figura 4.6 Respuesta en frecuencia de varias configuraciones con emisor LED y VCSEL.	33
Figura 4.7 Pérdidas e incremento de ancho de banda para las dos configuraciones y curvaturas.	34
Figura I.1 Comparación de la dimensión de diferentes tipos de fibras ópticas.....	43
Figura I.2 Estructura atómica del PMMA.	44
Figura I.3 Diferentes tipos de fibras ópticas de plástico.	45
Figura I.4 Propagación en una fibra MSI-POF.....	45
Figura I.5 Estructura de una SI-POF.	46
Figura I.6 Índice de refracción y propagación de rayos en la fibra.....	47
Figura I.7 Espectros de atenuación de fibras de PMMA-POF: SI (líneas discontinuas), GI(puntos discontinuos).	48
Figura I.8 Efecto de la dispersión en la fibra.	49
Figura I.9 Diferencia de caminos entre rayos dentro del núcleo en SI-POF y GI-POF.....	50
Figura I.10 Definición de ancho de banda.....	50
Figura II.1 Cortadora y peladora empleadas.	51

Figura II.2 Movimiento y posición durante el pulido.	52
Figura III.1 Representación en imagen de la distribución de potencia espacio-temporal a la salida de una fibra GH de 100 m y las integrales de potencia para el ángulo de salida y para el tiempo.	56
Figura IV.1 Panel de control del programa MedidasAngulares.vi de LabVIEW™.	57
Figura VIII.1 Diagrama de Gantt.	78

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo del proyecto

El trabajo descrito en esta memoria se enmarca en la línea de investigación de fibras ópticas de plástico y aplicaciones desarrollada en el Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones de la EINA, cuya actividad abarca desde el modelado de la fibra y dispositivos [1-3] hasta la aplicación en redes de corto alcance [4-6] pasando por el diseño y desarrollo de sistemas experimentales para caracterización de parámetros importantes en la transmisión [7-9].

Las fibras de plástico son fibras de un mayor tamaño que las de vidrio (1000 micras de núcleo frente a 9 o 50 micras) que, aunque presentan mayor atenuación (0.2 dB/m en lugar de 0.2dB/km) y menor capacidad, tienen la ventaja de poder utilizarse con componentes y dispositivos baratos, por lo que su uso se ha extendido en redes para automóviles y se está implantando también en redes dentro del hogar [10]. Actualmente, el grupo de POF está colaborando en un proyecto con investigadores del College of State Island que es una de las sedes del CUNY (*College University of New York*) para la implantación dentro de aviones de redes de datos basadas en POFs (*Plastic Optical Fibers*) [11].

Hasta el momento, el grupo se ha centrado en las fibras de plástico de 1 mm de un sólo núcleo, desarrollando un modelo matricial para describir la propagación de la luz, que se está integrando actualmente en software comercial para poder simular entornos complejos [12-14]. La matriz característica de la fibra proporciona una descripción completa de las variaciones que sufre la distribución espacio-temporal de potencia óptica al propagarse. Estas matrices se calculan a partir de las funciones angulares de atenuación y difusión que se obtienen a partir de datos experimentales [1]. Las predicciones del modelo matricial se han contrastado con medidas de parámetros de transmisión, como por ejemplo, el ancho de banda de la fibra [9]. Con esta misma metodología, se han caracterizado algunos componentes, como los conectores, cuya presencia en la red modifica la distribución espacial de potencia de la luz con impacto en sus propiedades de transmisión [15].

El objetivo de este proyecto se enmarca en esta última sub-línea, ya que se centra en la caracterización de los efectos de las curvaturas mediante una matriz de forma que puedan ser integrados en el modelo matricial de propagación. Aunque las POFs presentan mayor resistencia a las curvaturas que las fibras de vidrio, las pérdidas reportadas pueden llegar a ser de varios dB para curvaturas de diámetro menor de 4 cm. Además, es razonable esperar que las curvaturas no sólo produzcan pérdidas sino también transferencia de potencia y que ambas sean muy dependientes del ángulo de propagación. En la bibliografía analizada existen modelos basados en trazado de rayos que cuantifican la transferencia de potencia entre modos (ángulos), pero su coste computacional es alto [16]. Un método basado en la segmentación de la ecuación de flujo de potencia [17] es capaz de predecir los cambios en la

distribución angular de potencia, pero sólo se ha desarrollado para radios mayores de 1 m [18].

En este proyecto nos centraremos en curvaturas de diámetros relativamente pequeños, desde 7 cm hasta 0.6 cm ya que en el despliegue de las POFs en sus aplicaciones habituales en automóviles y hogares es frecuente que las fibras tengan que atravesar conductos pequeños, adaptarse a esquinas y sortear salientes. Por ello, se considerarán tanto vueltas completas (360°) que servirán para modelar los bucles a los que se somete la fibra para introducirla en cajas, como cuartos de vuelta (90°) que es una buena representación de la forma que toma la fibra en una esquina o al bordear una columna. La metodología utilizada parte de la previamente desarrollada para otros dispositivos y ha sido adaptada al caso concreto de las curvaturas debido a que, en este caso, los resultados son más sensibles a efectos espurios que pueden falsear su caracterización [3]. Dicho método se basa en la obtención de barridos de patrones de campo lejano (*FFP, Far Field Pattern*) para distintos ángulos de inyección, obtenidos primero para una fibra corta que se usa como referencia y después para la fibra con la curvatura que se desea caracterizar. Mediante la comparación de estas medidas, se obtienen las funciones angulares de atenuación y difusión que permiten el cálculo directo de la matriz característica de la curvatura [15]. Una vez obtenidas las matrices características, se ha validado el modelo utilizando medidas experimentales para compararlas con las predicciones del modelo. Además, se ha realizado un estudio de la permanencia temporal de los efectos causados por las curvaturas de menor radio. Finalmente, se ha postulado un modelo analítico que ha permitido extender e interpolar la caracterización a otros diámetros, facilitando su integración en la herramienta de simulación POF. Con esta herramienta, se ha analizado el impacto de las curvaturas en un caso simple de red doméstica.

1.2. Contenidos de la memoria

La memoria de este proyecto se ha estructurado en 5 capítulos complementados por varios anexos. En el capítulo, *Introducción*, se plantean el contexto, motivación y objetivos de la realización de este proyecto, y se presenta la organización de los contenidos de la memoria.

En el segundo capítulo, *Metodología de trabajo*, se describe en primer lugar el sistema experimental para el registro de imágenes de campo lejano y extracción de los correspondientes perfiles radiales. Después, se detalla el protocolo de obtención de medidas así como su posterior procesamiento, ilustrando con ejemplos el proceso completo hasta la obtención de las funciones de atenuación y difusión. Además, se presentan los experimentos y resultados de un estudio realizado para determinar la influencia del sentido de giro de las curvaturas en la atenuación y difusión. Finalmente, se describe el promediado final de las medidas para obtener los resultados definitivos.

En el tercer capítulo, *Modelo matricial de curvaturas*, se presentan las funciones de atenuación y difusión características de las curvaturas analizadas así como las matrices características calculadas a partir de ellas y se comparan estos resultados con los correspondientes a otros elementos de red y a las propias fibras. Además, el modelo se valida experimentalmente realizando registros de campos lejanos con fuentes extensas y medidas de las pérdidas de potencia en función del diámetro de curvatura que se comparan con los resultados de la simulación. Finalmente, se analiza la permanencia de los efectos ocasionados por las curvaturas sobre la fibra y se caracterizan las curvaturas en esquinas *realistas*.

En el siguiente capítulo, *Modelo analítico y simulación en entorno real*, se presenta un modelo analítico para curvaturas de 360° y 90° que permite obtener la matriz característica de cualquier diámetro de curvatura desde los 0.55 hasta los 10 cm. Este modelo, una vez integrado en la herramienta de simulación de POF, se aplica en el estudio del impacto de las curvaturas en varios puntos de una red doméstica sencilla.

En el quinto y último capítulo, *Conclusiones*, se exponen las conclusiones sintetizando todo el trabajo realizado, explicando las aportaciones y haciendo una valoración del trabajo realizado. Además, se plantean posibles líneas de trabajo futuras que se han abierto como consecuencia de los resultados de este proyecto.

Asimismo, se adjuntan 7 anexos para ampliar y facilitar la comprensión del proyecto.

En el Anexo I, *Fibra óptica de plástico*, se hace una introducción a las fibras ópticas de plástico, los distintos tipos, una breve descripción de las características geométricas de la fibra utilizada y la definición de algunos parámetros de interés en comunicaciones.

En el Anexo II, *Proceso de preparación de la fibra*, se describen las herramientas utilizadas y el procedimiento seguido en la preparación de los extremos de las fibras de plástico.

En el siguiente, Anexo III, *Modelo matricial de propagación de potencia óptica en POFS*, se explica detalladamente el modelo matricial de propagación para fibra de plástico.

En el Anexo IV, *Entorno de medida de FFPs (LabVIEW™)*, se describe el interfaz de LabVIEW™ del que se dispone en el laboratorio para la realización de las capturas de barridos del FFP.

El Anexo V, *Programas desarrollados en el proyecto (Matlab™)*, proporciona una breve descripción de los programas de Matlab™ desarrollados específicamente para este proyecto.

En el Anexo VI, *Manuales y hojas de características*, se incluyen el manual que explica el uso de la Toolbox de Matlab™ desarrollada por el grupo y las hojas de características de la fibra y los instrumentos empleados en el desarrollo del proyecto.

El Anexo VII, *Artículo POF2015*, contiene el trabajo presentado en el congreso 24th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application, POF2015, de Núremberg, en septiembre de 2015.

Y en un último Anexo VIII, *Diagrama de Gantt*, se muestra el diagrama con la distribución temporal de los trabajos realizados.

Capítulo 2: METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para caracterizar las curvaturas en fibras de plástico vamos a seguir una metodología aplicada anteriormente en la caracterización de otros dispositivos, que se basa en la medida experimental de los perfiles de campo lejano (FFP) de fibras cortas [3]. El patrón de FFP es la distribución espacial de potencia óptica en función de los ángulos de salida a una distancia suficientemente alejada de la fibra. Esta distribución está determinada por la distribución modal, que depende de la longitud de la fibra, de la difusión y atenuación de la misma y de las condiciones de inyección. Las perturbaciones localizadas como pueden ser las curvaturas modifican esta distribución modal, lo que sugiere comparar los perfiles del FFP medidos con y sin la perturbación para su caracterización. Además, los perfiles se obtienen en ambos casos cambiando el ángulo de inyección para ver el efecto de la perturbación en función del ángulo. El problema que presentan las curvaturas respecto a otros dispositivos ya caracterizados es la realización de un sistema experimental en el que no se produzcan curvaturas espurias que puedan afectar a las medidas.

En este proyecto, se han analizado los efectos de curvaturas de pequeño diámetro (de 7 a 0.6 cm) en una fibra de PMMA (polimetilmetacrilato) de perfil de salto de índice y de 1 mm de diámetro del núcleo. Esta fibra es la ESKA™ PREMIER de Mitsubitshi GH-4001, cuya hoja de características se encuentra en el Anexo VI.2. A partir de ahora nos referiremos a esta fibra como GH.

De esta forma, la organización de este capítulo será la siguiente: en primer lugar, se describe de forma breve el sistema experimental para la obtención de barridos del FFP desarrollado en proyectos anteriores, haciendo hincapié en las modificaciones realizadas para este proyecto [3,15]. En segundo lugar, se detalla el protocolo experimental con los pasos que hay que seguir para obtener las funciones de atenuación y difusión a partir de las medidas experimentales. Finalmente, se describen experimentos de control para determinar la influencia del sentido de la curvatura en la atenuación y difusión y se analiza la variabilidad de nuestras estimaciones.

2.1. Sistema experimental de obtención de barridos de FFP

El sistema para la medida experimental de los barridos de FFP se muestra en la Figura 2.1 donde se representa la configuración diseñada para realizar curvaturas de 360°, utilizando la torre de curvaturas cuyo esquema se presenta en la parte inferior derecha de la figura. La torre, que cuenta con alturas de distintos diámetros: 0.6, 1.2, 2.6, 5 y 7 cm, se ha utilizado para curvar la fibra una vuelta completa (360°) o un cuarto de vuelta (90°), como se muestra en los esquemas de la parte superior derecha. Para cada condición analizada, el diseño del sistema se ha modificado ligeramente para evitar curvaturas espurias de radios similares a las analizadas.

como una imagen. Un ejemplo obtenido para un tramo de fibra GH de 2 m se representa en la Figura 2.2:

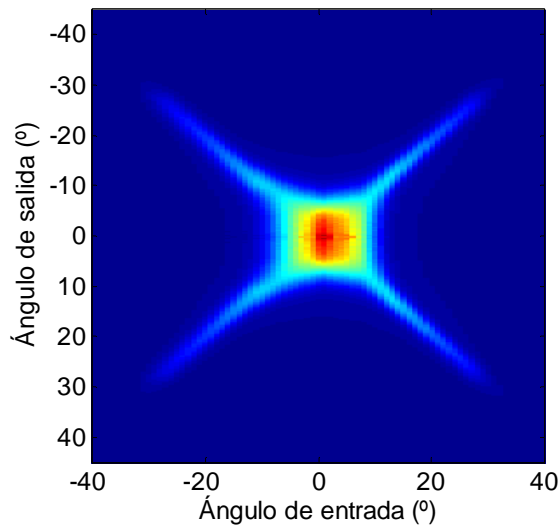


Figura 2.2 Matriz de perfiles radiales para una fibra GH de 2 m.

La imagen muestra los niveles de potencia con una paleta de colores del rojo al azul, siendo los colores cálidos los correspondientes a los niveles más altos, y los fríos a los más bajos. Cada columna representa el perfil radial para un ángulo de entrada (eje horizontal) en función del ángulo de salida (eje vertical) que corresponde a los ángulos de propagación de la luz en la fibra. La parte superior de la imagen es una réplica de la inferior que resulta de la simetrización de los datos experimentales para facilitar la visualización. Por otra parte, se han realizado medidas tanto para ángulos de inyección positivos como negativos. El hecho de que éstas no sean idénticas permite apreciar la desviación respecto a la respuesta simétrica ideal.

2.2. Protocolo de medida

El protocolo seguido en el proceso de caracterización parte de la obtención de las medidas experimentales y culmina con la obtención de la atenuación y difusión angulares a partir de los perfiles radiales medidos.

2.2.1 Registro de barridos de FFPs con y sin curvatura

Preparación de la fibra: En primer lugar se preparan ambos extremos de una fibra de entre 2 y 2.5 metros de longitud utilizando las herramientas más adecuadas para la misma que se determinaron en un trabajo anterior [19] y siguiendo los pasos descritos en el Anexo II. Se han utilizado fibras de esta longitud para poder alejar las curvaturas producidas en el extremo de inyección de la curvatura bajo test y se han ensayado distintas formas de colocación de la fibra, de forma que las curvaturas que se produzcan sean las menos posibles y que su radio sea siempre mayor que el que se quiere analizar. Una vez instalada la fibra en el sistema, se procede a alinear tanto el extremo de fibra enfrenteado al láser como el que está enfrenteado a

la pantalla. El proceso de alineamiento de la fibra es largo, ya que es crucial que la punta de la fibra esté exactamente sobre el eje del rotor y alineada con el láser, de forma que el ángulo de inyección sea el correcto y que no se produzcan desplazamientos durante el barrido que falsearían las medidas.

Medida del barrido de FFPs de la referencia: Medida del barrido de FFPs para este tramo, que se utilizará como referencia para normalizar las medidas con curvaturas y así compensar posibles efectos de la fibra concreta aislando los efectos de éstas.

Aplicación de la curvatura: Se aplica la curvatura que se quiere caracterizar cerca del extremo de salida de la fibra. En todas las medidas siempre se mantiene una distancia de al menos 20 cm de fibra estirada antes de la curvatura, así como desde ésta a la pantalla, consiguiendo que en esos dos tramos la única perturbación sea la curvatura a caracterizar. Cuando se aplica la curvatura es fundamental que no se modifique la inyección ni la posición del extremo de salida de la fibra para que se mantengan las mismas condiciones que en la medida de la referencia. Además, se utiliza un vástago para elevar la torre a la altura necesaria, evitando curvaturas sobre el eje vertical y, según el tamaño de la curvatura, la torre se cambia de posición de forma que la fibra siga siempre una trayectoria recta dentro de la caja.

Medida del barrido de FFPs con la curvatura: Una vez aplicada la curvatura, se realiza otro barrido del campo lejano. Generalmente, hay que aumentar el tiempo de exposición para tener un mayor rango dinámico en las imágenes, manteniendo el resto de parámetros igual que al medir la referencia. El valor del tiempo de exposición junto con los demás parámetros se registra en un fichero para cada barrido, para posteriormente realizar la corrección sobre los valores de potencia obtenidos. Una vez realizados los barridos para ese diámetro, se modifica la fibra para aplicar una nueva curvatura.

Las tandas de medidas se realizan siempre con un orden de diámetros descendente: 7 cm - 5 cm - 2.6 cm - 1.2 cm - 0.6 cm, de esta forma se mantiene la misma posición de la fibra y, por tanto, la misma referencia para toda la serie. Se sigue un orden descendente de diámetros para que las medidas no se vean afectadas por el posible deterioro de la fibra en los tamaños más pequeños. Las series de 360° y 90° se realizan de forma independiente, con un nuevo segmento de fibra con la que se obtiene una nueva referencia y siguiendo el mismo orden de diámetros.

En la Figura 2.3 se representan las matrices de barridos de perfil radial obtenidos para la referencia (izquierda), P^{REF} , junto con los obtenidos con la fibra curvada, P^{CR} , para diámetros de 5 cm y 1.2 cm. Las imágenes de arriba se obtuvieron con una vuelta completa y las de abajo, dando un cuarto de vuelta. Las referencias son diferentes ya que para obtener cada serie se utilizó un tramo de fibra distinto. Las imágenes de cada fila se han normalizado al máximo que se encuentra en la referencia correspondiente. La comparación de las imágenes permite observar la pérdida de potencia o atenuación producida por la curvatura que es mayor en los ángulos más altos, pero también un ensanchamiento que es debido a la difusión o transferencia de potencia entre ángulos. Estos efectos son más intensos cuanto menor es el radio de curvatura.

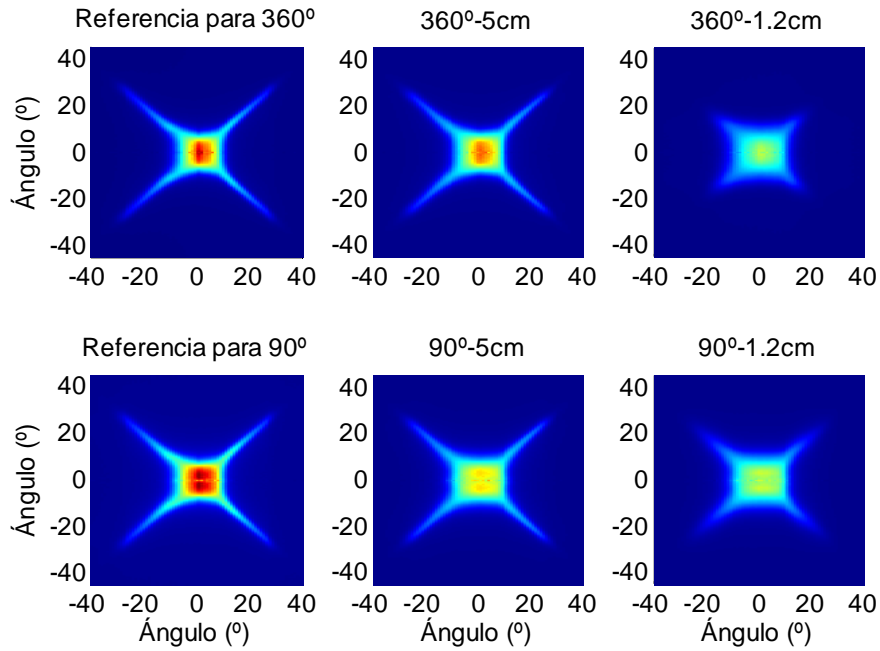


Figura 2.3 Matrices de barridos de FFP para la referencia y curvaturas de 5 y 1.2 cm de diámetro. En la parte superior se representan las imágenes para 360° y en la inferior para 90°.

2.2.2 Obtención de los parámetros del modelo

Los efectos de la curvatura: pérdida de potencia (atenuación) y transferencia de potencia entre ángulos (difusión), son los mismos que se producen al propagarse la luz por una fibra y que se han modelado mediante una matriz tridiagonal $\mathbf{M}^{CR,0}$:

$$\mathbf{M}^{CR,0} = \mathbf{A} + \mathbf{D} \quad [2.1]$$

Donde \mathbf{A} es la matriz diagonal de atenuación y \mathbf{D} la matriz de difusión que se calculan a partir de las funciones de atenuación y difusión de la forma descrita en el Anexo III [2,9]. Como los efectos de las curvaturas son intensos y localizados, será necesario simularlos mediante la propagación a través de varios metros de fibra de la misma forma que se ha hecho con otras perturbaciones localizadas [15]. Así pues, la matriz tridiagonal $\mathbf{M}^{CR,0}$, deberá elevarse a una determinada potencia:

$$\mathbf{M}^{CR} = (\mathbf{M}^{CR,0})^{L/\Delta z} \quad [2.2]$$

siendo $L = 10$ m la longitud de fibra y $\Delta z = 1$ mm los parámetros elegidos para modelar los efectos de las curvaturas. A continuación, vamos a describir como extraer las funciones de atenuación y difusión a partir de las medidas obtenidas, siguiendo un procedimiento similar al aplicado para la caracterización de conectores [15].

Obtención de la función de atenuación angular

La función de atenuación angular puede obtenerse directamente a partir de las matrices de perfiles radiales sin y con curvatura obtenidas experimentalmente: \mathbf{P}^{REF} y \mathbf{P}^{CR} . Para justificar esto, partimos de las expresiones para el cálculo de los elementos de la matriz básica que figuran en el Anexo III, particularizadas para $\omega = 0$:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k,k-1} &= (d(k \cdot \Delta\theta) - \frac{1}{2} d'(k \cdot \Delta\theta) \Delta\theta) \frac{\Delta z}{\Delta\theta^2} \\ \mathbf{P}_{k,k-1} &= \exp(-\Delta z \cdot \alpha(k \cdot \Delta\theta)) - 2d(k \cdot \Delta\theta) \frac{\Delta z}{\Delta\theta^2} \\ \mathbf{P}_{k,k+1} &= (d(k \cdot \Delta\theta) + \frac{1}{2} \frac{d(k \cdot \Delta\theta)}{k} + \frac{1}{2} d'(k \cdot \Delta\theta) \Delta\theta) \frac{\Delta z}{\Delta\theta^2} \end{aligned} \quad [2.3]$$

Podemos ver que, al realizar la suma de todos los elementos de una fila de la matriz \mathbf{P} , los términos dependientes de la difusión y sus derivadas se cancelan quedando un término exponencial que depende de la atenuación angular:

$$\mathbf{P}_{k,k-1} + \mathbf{P}_{k,k} + \mathbf{P}_{k,k+1} = \exp(-\Delta z \cdot \alpha(k \cdot \Delta\theta)) \quad [2.4]$$

Esta propiedad se mantiene al elevar la matriz básica a una potencia de manera que se cumple tanto para la matriz de referencia como para la obtenida con la curvatura. Por tanto, la variación de potencia introducida por la curvatura en cada ángulo puede obtenerse realizando la siguiente operación:

$$\alpha(k \cdot \Delta\theta) \rightarrow \alpha_k^{CR} = \frac{10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{k'} \mathbf{P}_{k,k'}^{REF}}{\sum_{k'} \mathbf{P}_{k,k'}^{CR}} \right)}{L}, \quad [2.5]$$

donde \mathbf{P}^{REF} es la matriz de referencia y \mathbf{P}^{CR} es la de la curvatura. De esta forma, se obtiene un valor de la función atenuación α para cada uno de los ángulos de salida ($k \cdot \Delta\theta$) que es una estimación de la variación de la potencia para ese ángulo producida por la curvatura. En la expresión anterior ya se ha tenido en cuenta que la curvatura se modela como una fibra de longitud L . Los valores α_k^{CR} obtenidos de esta forma representan un muestreo de la función de atenuación característica de la curvatura: $\alpha(\theta)$.

Debido a la falta de simetría de las medidas respecto al eje de ordenadas (ángulo de inyección) que ya hemos señalado antes, cada uno de los dos cuadrantes superiores será considerado como una medida independiente y procesado separadamente, normalizando cada uno de ellos con el cuadrante correspondiente de la matriz de referencia.

En la Figura 2.4 se han representado en dB/m las atenuaciones obtenidas para curvaturas de 1.2 cm de diámetro cuyas matrices de perfiles radiales se mostraron en la figura anterior. Esta atenuación no representa la variación total de potencia causada por la curvatura sino que es la función característica de la misma, modelada como una fibra de 10 metros. Para conocer la variación total de potencia en la curvatura, el valor mostrado en las gráficas debería multiplicarse por 10. Cada gráfico muestra la atenuación obtenida a partir de medidas de un mismo barrido pero con ángulos de inyección positivos (en rojo) y negativos (en azul). En esta figura se aprecian las menores pérdidas producidas por un cuarto de vuelta con respecto de las

producidas por una vuelta completa, pero en ambos casos se observa que, tras una región de variación más o menos suave hay un ángulo a partir del cual la atenuación crece y que llamaremos ángulo de corte característico de la curvatura. La disminución de la atenuación en ángulos alrededor de 25° es debida a que los valores medidos para estos ángulos con la curvatura se estancan al alcanzar el nivel de ruido de las imágenes. El aumento o estancamiento posterior por encima de 40° corresponde a que los valores para la referencia también son muy bajos. Básicamente, vamos a considerar que la estimación es válida hasta el ángulo en que se alcanza el máximo, que cambia ligeramente dependiendo del diámetro de la curvatura. A partir de dicho valor, se ha realizado una extrapolación mediante una recta cuya pendiente se ha estimado con el valor de la misma en los últimos puntos de la zona de crecimiento monótono, como se mostrará en el siguiente capítulo.

Por otra parte, la figura ilustra la alta variabilidad de las medidas comparando la estimación de la atenuación obtenida con inyección en ángulos positivos con la obtenida con los negativos, siendo ambas de la misma muestra de fibra. Las diferencias entre ambas estimaciones son mayores en la zona correspondiente a ángulos bajos, ya que es más sensible a inhomogeneidades en los extremos de la fibra, a su posición, etc. Además, la figura muestra que para algunos ángulos, la atenuación disminuye hasta tener signo negativo. El significado físico de una atenuación negativa en nuestro caso, es que la curvatura favorece la transmisión de potencia en dichos ángulos respecto del caso con la fibra estirada.

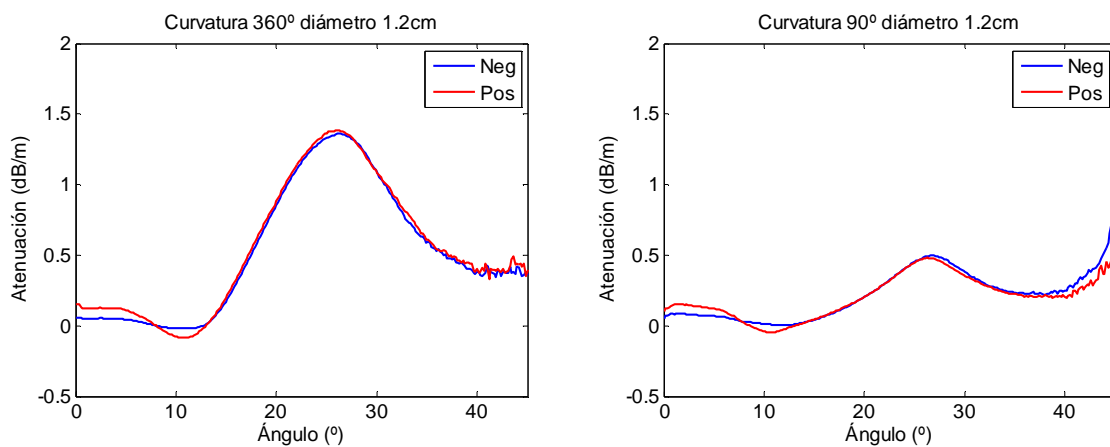


Figura 2.4 Función de atenuación para curvatura de 360° y 90° con diámetro 1.2 cm.

Obtención de la difusión

Una vez calculada la función de atenuación para cada medida, se procede a caracterizar la difusión asociada a la curvatura ajustando los parámetros de una función analítica utilizada para representar la difusión. Esto se lleva a cabo minimizando una función de coste utilizando las medidas experimentales y la atenuación obtenida en el paso anterior. Para ello se ha utilizado la rutina de Matlab™: *fminsearch*, definiendo los parámetros adecuados con *optimset*. La función de coste que define el error que se debe minimizar, es la siguiente:

$$f_{coste} = \| \mathbf{P}^{CR} - \mathbf{P}_{sim}^{CR} \| \quad [2.6]$$

Con:
$$\mathbf{P}_{sim}^{CR} = \mathbf{M}^{CR} \cdot \mathbf{P}^{REF} \quad [2.7]$$

donde \mathbf{P}^{CR} es la matriz de perfiles radiales medidos experimentalmente con la curvatura y \mathbf{P}_{sim}^{CR} es el producto matricial de la matriz característica de la curvatura por la matriz de referencia, \mathbf{P}^{REF} . La matriz característica se calcula usando las ecuaciones [2.1-2.2] introduciendo la atenuación estimada en el apartado anterior y la función de difusión de prueba. Inicialmente, se modeló la difusión con una función bisigmoide como la utilizada para modelar la propagación en las fibras [9] que viene dada por:

$$d(\theta) = D_0 + \frac{D_1}{1 + D_2 e^{(D_3 \theta)^2}} \quad [2.8]$$

Sin embargo, nuestros resultados han demostrado que con una difusión constante se obtienen resultados más robustos y el mínimo error obtenido no se modifica sustancialmente.

Siguiendo con el mismo ejemplo mostrado en el paso anterior, con 1.2 cm y 360° de vuelta se obtienen unas difusiones de $1.8735e-4 \text{ rad}^2/\text{m}$ para ángulos de inyección positivos y de $1.3003e-4 \text{ rad}^2/\text{m}$ para ángulos de inyección negativos. Para 90°, se obtienen difusiones de $1.7893e-4 \text{ rad}^2/\text{m}$ y $1.3688e-4 \text{ rad}^2/\text{m}$ para ángulos positivos y negativos, respectivamente. En la Figura 2.5 se muestra el cuadrante de las matrices de perfiles radiales para ángulos de inyección positivos correspondientes a las medidas obtenidas con un diámetro 1.2 cm, para curvaturas de 90° (arriba) y 360° (abajo). A la izquierda se muestran las medidas experimentales y a la derecha las simuladas. La figura muestra un buen acuerdo entre ambas, como refleja también el valor del error que es: 1.1051 en el caso de 90° y 0.9738 en el de 360°.

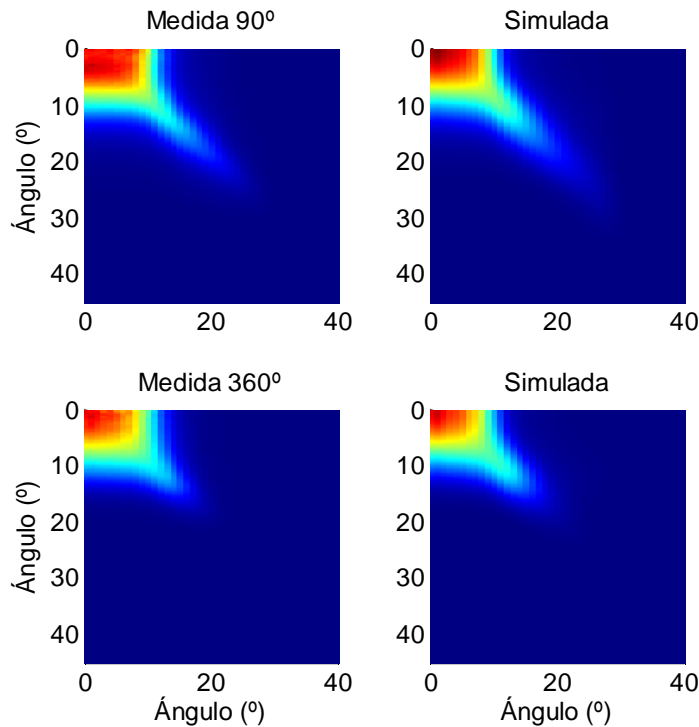


Figura 2.5 Cuadrante positivo de las matrices de FFP para curvatura 360°-1.2 cm: experimental (izquierda) y simulado (derecha).

2.3. Influencia del sentido de giro de la curvatura

Algunos resultados obtenidos en otros proyectos apuntan a que el sentido de giro de la curvatura podría tener un cierto impacto sobre sus propiedades debido a asimetrías cuyo origen está relacionado con el proceso de fabricación y almacenamiento de la fibra [20]. Esto ha llevado a realizar cambios en el sistema experimental para determinar el efecto que el sentido de giro de la curvatura tiene sobre la atenuación y difusión estimadas con el método descrito.

2.3.1 Atenuación

Para determinar si la atenuación producida por la curvatura es significativamente diferente dependiendo del signo de ésta, se han realizado varias series de medidas cambiando el sentido de giro en cada tamaño de diámetro, siguiendo el orden descrito en el protocolo de medida. Se han realizado pruebas, además, realizando primero la medida para la dirección positiva (en el sentido de las agujas del reloj) y otras siendo la primera la negativa (en el contrario).

Para curvaturas de 360° , el montaje se modifica cambiando la posición de la torre de diámetros según el sentido de giro para que la fibra quede recta y no introducir nuevas curvaturas próximas al extremo de salida. Para 90° , se requiere, además de modificar la posición de la torre, una nueva entrada para la fibra en el lateral de la caja sellada de manera que la fibra vaya en línea recta hasta la torre de curvaturas, manteniendo la longitud de los tramos rectos antes y después de la curvatura definidos en el protocolo experimental. Estas configuraciones se representan esquemáticamente en la Figura 2.6.

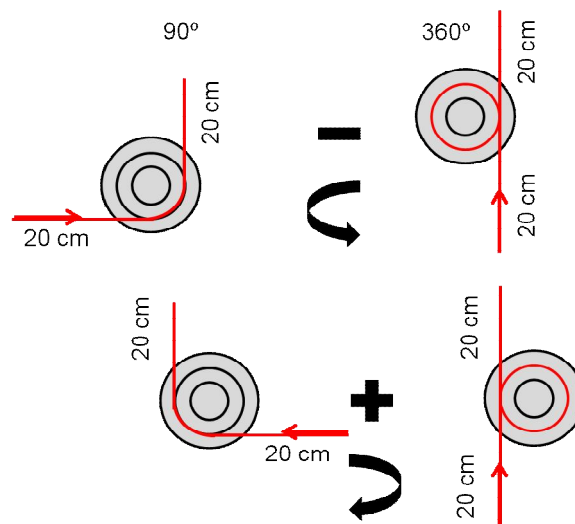


Figura 2.6 Configuración de las curvaturas de 360° y 90° para signo positivo y negativo.

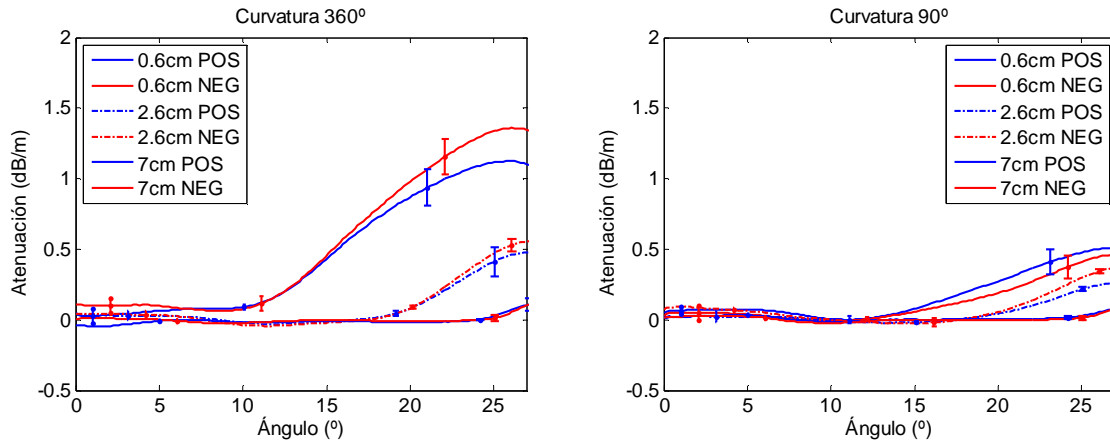


Figura 2.7 Atenuaciones curvaturas 360° y 90° para ambos sentidos.

La Figura 2.7 muestra el promedio de las atenuaciones medidas con cada uno de los dos sentidos de giro para 360° y 90° con diámetros de 7 cm, 2.6 cm y 0.6 cm. Los resultados para los dos diámetros no mostrados en la figura (5 y 1.2 cm) son similares y muestran que no hay diferencias sistemáticas ya que encontramos que para unos casos la atenuación es mayor para giro positivo y otras para giro negativo. Tampoco influye el orden en que se ha efectuado el cambio de signo. Además, en la mayoría de los casos las diferencias encontradas entre giros se encuentran dentro de la desviación estándar, lo que indica que éstas no son significativas. Por tanto, para la obtención de los resultados finales se promediarán todas las medidas sin hacer distinción de signos.

2.3.2 Difusión

Siguiendo el proceso descrito anteriormente, se han calculado también las difusiones a partir de las medidas y atenuaciones para cada sentido de giro. En la Figura 2.8 se representan los valores para la difusión obtenida con giro negativo y giro positivo promedio en función del diámetro de la curvatura.

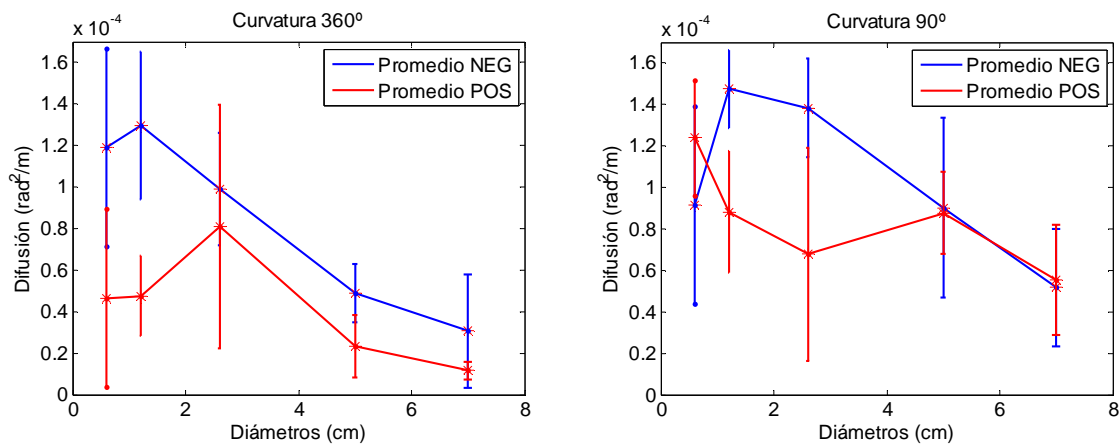


Figura 2.8 Difusiones para ambos sentidos de giro para curvaturas de 360° (izquierda) y 90° (derecha).

Para 360° la difusión obtenida con el giro positivo es menor que para el negativo con todos los diámetros. Estas diferencias son mayores para radios más pequeños por lo que parece que se trata de un efecto ligado a la curvatura. Sin embargo, prácticamente en todos los casos las diferencias están dentro de la desviación estándar (representada como barras de error) que es bastante elevada debida a la gran variabilidad. En cuanto al giro de 90° las diferencias son menores en general que las observadas para 360°, y no siempre son menores para el giro positivo. Por ello, de la misma manera que se ha hecho con la atenuación, se ha modelado la difusión para cada radio y ángulo de curvatura, promediando todos los valores obtenidos para ambos sentidos de giro.

2.4. Promediado final

Basándonos en la estimación de la atenuación descrita en el apartado 2.2.2, y durante todo el proceso de obtención de medidas experimentales, se han analizado los factores relacionados con su variabilidad con la intención de minimizarlos en lo posible, lo que ha llevado al diseño del sistema y protocolo experimental antes descrito. En este sentido, se han realizado medidas con distintos tramos de fibra así como con la misma fibra utilizando distintos métodos de preparación, cambiando su posición en la zona más alejada de la curvatura, etc., para tener una mejor estimación de la variabilidad de la medida. Cuando se ha cambiado el segmento de fibra utilizado y su posición, se han respetado las longitudes mínimas de los tramos rectos de fibra antes y después de la curvatura, establecidos en el protocolo. Finalmente, los resultados definitivos se han obtenido promediando las atenuaciones obtenidas con al menos 8 medidas, incluyendo las obtenidas para ambos signos del ángulo de inyección y utilizando indistintamente las obtenidas con giros en ambos sentidos.

Para ilustrar la variabilidad de los resultados, en la siguiente figura se muestran como ejemplo todas las atenuaciones obtenidas para caracterizar la curvatura con diámetro de 2.6 cm para 360° y 90° junto con el promedio obtenido y su desviación estándar en varias regiones características, así como los valores de la difusión, su promedio y su desviación.

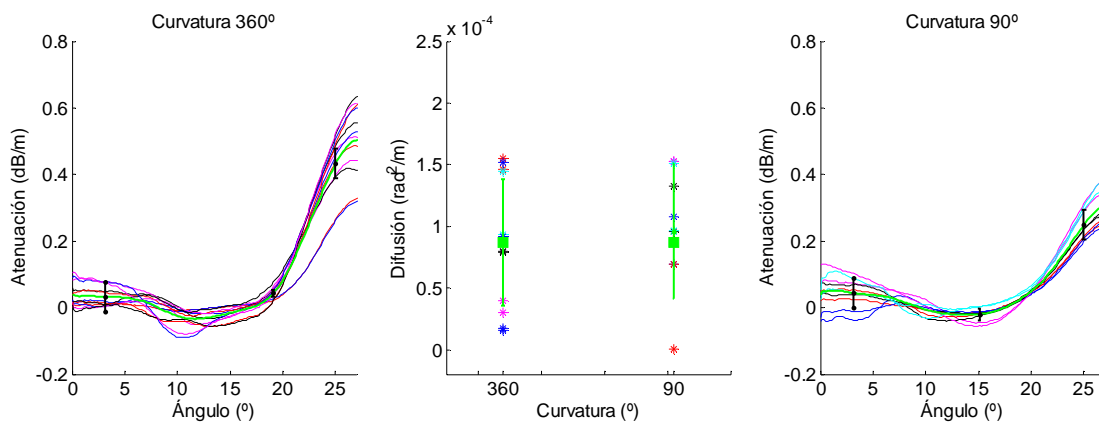


Figura 2.9 Atenuación y difusión características para curvaturas de 360° y 90° con diámetro 2.6 cm. Medidas y promedio con desviación estándar.

Los resultados finales del coeficiente de difusión y de la función de atenuación angular se presentarán para todas las curvaturas analizadas en el siguiente capítulo así como las matrices características estimadas a partir de ellas.

Capítulo 3: MODELO MATRICIAL DE CURVATURAS

En este capítulo, se muestran las funciones de atenuación y difusión promedio obtenidas siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior, para los diámetros de 7, 5, 2.6, 1.2 y 0.6 cm y los dos ángulos de giro: 360° y 90° y las matrices características calculadas a partir de ellas. A continuación, se procederá a validar experimentalmente el modelo, comparando medidas experimentales con resultados obtenidos mediante simulación de los efectos de las curvaturas utilizando las matrices características. Además, se analiza la permanencia de los efectos de la curvatura, estudiando la evolución temporal de la atenuación y difusión. Finalmente, se caracterizan también los efectos producidos con curvaturas más realistas como son las que se producen al colocar la fibra en una esquina, tanto interior como exterior.

3.1 Cálculo de las matrices características

La matriz característica de cada curvatura, se calcula introduciendo en las ecuaciones [2.1-2.2] las correspondientes funciones de atenuación y difusión obtenidas tal como se ha explicado en el capítulo anterior.

3.1.1 Funciones de atenuación angular

En la Figura 3.1 se muestran las atenuaciones promedio en dB/m obtenidas con todos los diámetros estudiados para curvaturas de 360° y 90° . La región de ángulos altos (a partir del máximo) se ha extrapolado utilizando una recta estimada a partir de la pendiente de los últimos puntos del último tramo creciente. En la figura se incluyen las desviaciones estándar como barras de error para cada uno de los diámetros en varios puntos significativos de las curvas.

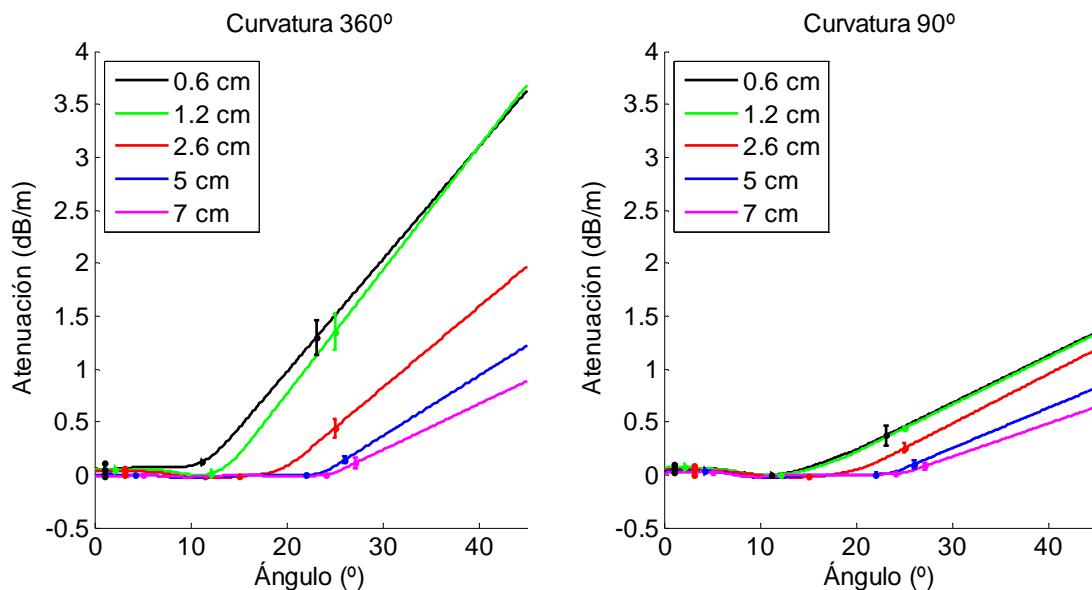


Figura 3.1 Atenuaciones promedio definitivas para las curvaturas estudiadas.

Se observa que el ángulo para el que la atenuación comienza a crecer abruptamente, que hemos llamado ángulo de corte, disminuye al disminuir el diámetro de la curvatura. Para un diámetro fijo, el ángulo de corte es mayor para 90° que para 360° , mientras que la pendiente es mayor para 360° .

3.1.2 Parámetros de difusión

La difusión se obtiene a partir de la atenuación, minimizando la función de coste [2.6] para cada medida como se explica en el protocolo experimental. Los coeficientes de difusión promedio de todas las medidas obtenidas para un diámetro y ángulo de curvatura se representan en rad^2/m en función del diámetro de curvatura en la Figura 3.2 junto con las correspondientes desviaciones estándar para 90° y 360° .

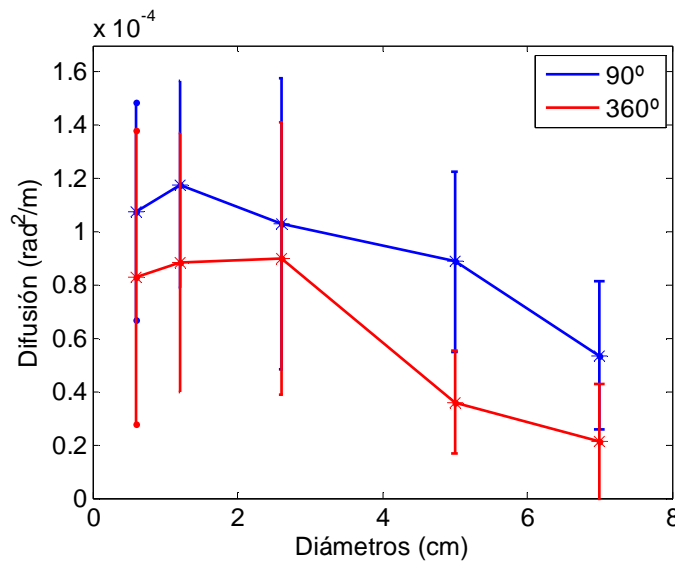


Figura 3.2 Difusiones promedio definitivas para las curvaturas estudiadas.

Se puede observar que las difusiones para el caso de la curvatura de 90° son siempre mayores que para la curvatura de 360° , aunque para diámetros más pequeños las diferencias son menores y la desviación estándar es mayor.

3.1.3 Matrices de curvaturas

Las matrices características, \mathbf{M}^{CR} , se calculan utilizando las funciones de atenuación y difusión promedio de las Figura 3.1 y Figura 3.2 y las ecuaciones [2.1-2.2]. La Figura 3.3 las muestra para todos los diámetros y curvaturas de 360° y 90° . Todas las imágenes se han normalizado al máximo de todas ellas (que se encuentra en la correspondiente a 7 cm y 360°) para poder comparar los efectos producidos.

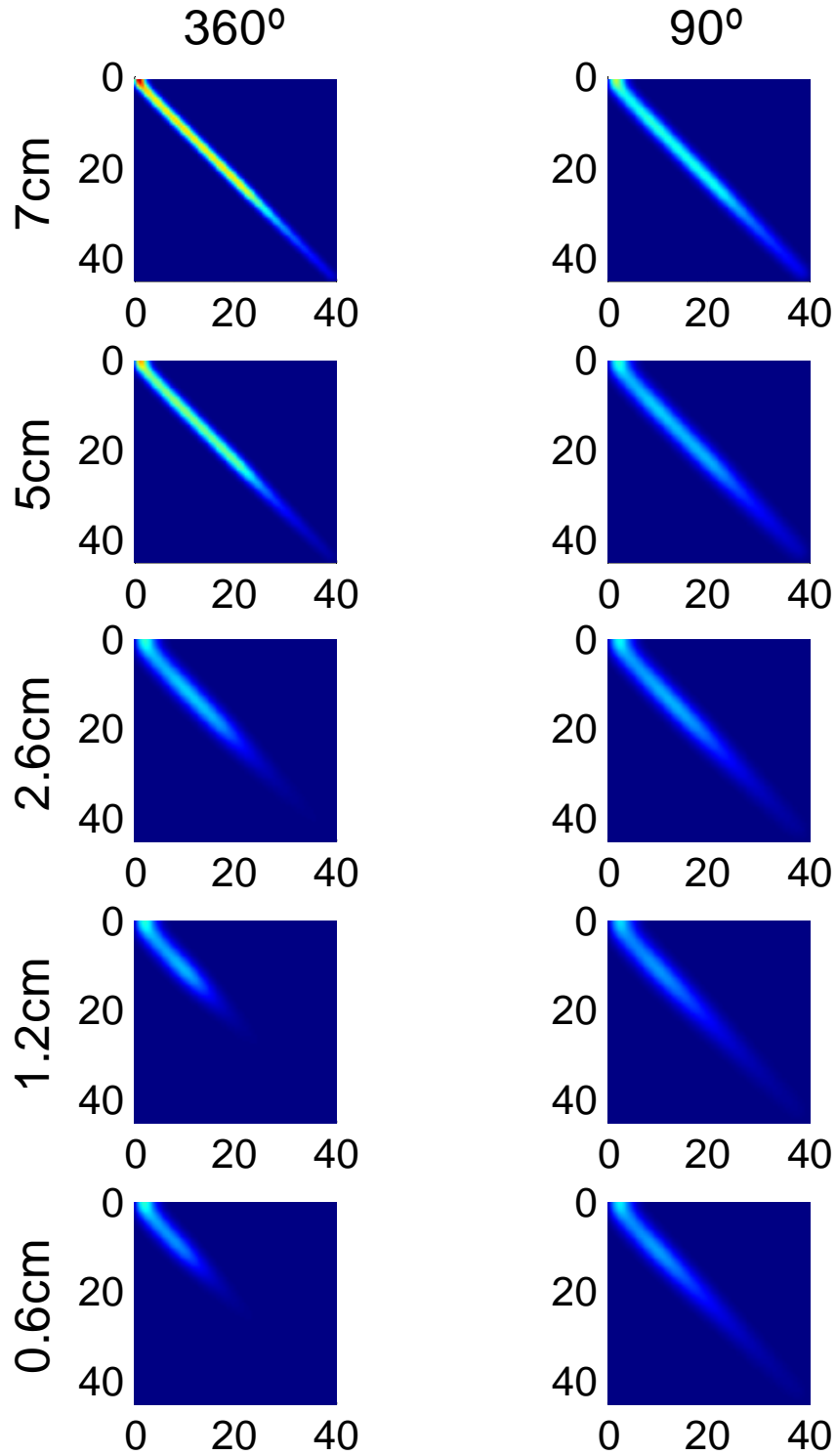


Figura 3.3 Matrices características para las curvaturas de 90° y 360°.

Se puede ver como las curvaturas de 360° bloquean un mayor rango de ángulos altos que las correspondientes de 90° con el mismo diámetro, ya que el ángulo de corte es menor en el primer caso y la pendiente de la atenuación más abrupta. Este efecto es fácilmente observable en los diámetros más pequeños: 1.2 y 0.6 cm. Sin embargo, en las matrices de 90° se observa mayor difusión particularmente en los diámetros mayores (mayor anchura de la diagonal) y atenuaciones más altas en los ángulos bajos (colores más fríos). La mayor difusión y

atenuación obtenidas para un cuarto de vuelta donde, sin embargo, el tramo de fibra curvada es más corto puede justificarse con las conclusiones derivadas de los resultados de un estudio anterior [21]. En dicho estudio, tras analizar diferentes configuraciones combinando tramos rectos y curvaturas, se encontró que las transiciones curva-recta en la fibra favorecen mayores pérdidas. Por ello, nuestros resultados son consecuentes ya que en el caso de 90° hay una mayor proporción de transiciones curva-recta que en 360° .

3.2 Comparación con otros elementos

En la Figura 3.4, se comparan los valores de atenuación y difusión para las curvaturas con los obtenidos para el conector ST con dos procesos de terminación diferentes (aplicando y sin aplicar un proceso de pulido). Además, se han representado también los valores de atenuación y difusión para la fibra GH. La difusión de la fibra es una función del ángulo de propagación que, como se muestra, es mayor para ángulos bajos y alcanza un valor estable menor para ángulos mayores. En el caso de la atenuación, solo se muestran los casos de las curvaturas con 0.6 cm de diámetro que son las que producen mayor atenuación.

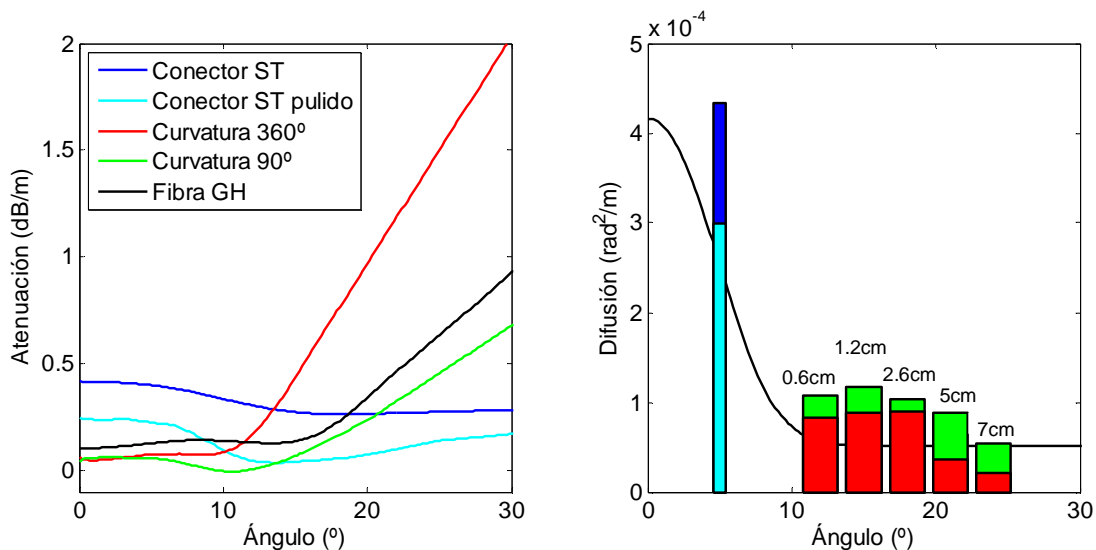


Figura 3.4 Atenuaciones y difusiones promedio para las curvaturas, fibra GH y conector.

Se puede ver que, para ángulos bajos la atenuación del conector es bastante mayor que la producida por las curvaturas pero que, como sus efectos tienen menor variación con el ángulo, las curvaturas atenúan más los ángulos altos. En cuanto a la difusión también es mayor la producida por el conector, que es similar a la de la fibra en ángulos bajos (incluso para el conector pulido). De hecho, el valor de difusión del conector ST pulido es hasta 3 veces mayor que los de las curvaturas. Los valores de difusión producida por las curvaturas son más similares a los de la fibra para ángulos superiores a 8° .

Aunque la atenuación de la fibra es mayor que la característica de las curvaturas de 360° para ángulos pequeños y, para la curvatura de 90° es mayor para todo el rango, hay que tener en cuenta que para obtener el efecto global de la curvatura hay que multiplicar por 10 ya que se ha modelado como una fibra de esta longitud. Para visualizar esto más claramente, en la

siguiente figura se muestran las matrices características de una fibra de 10 m, un conector ST pulido y las correspondientes a las curvaturas de 360° y 90° con 0.6 cm de diámetro.

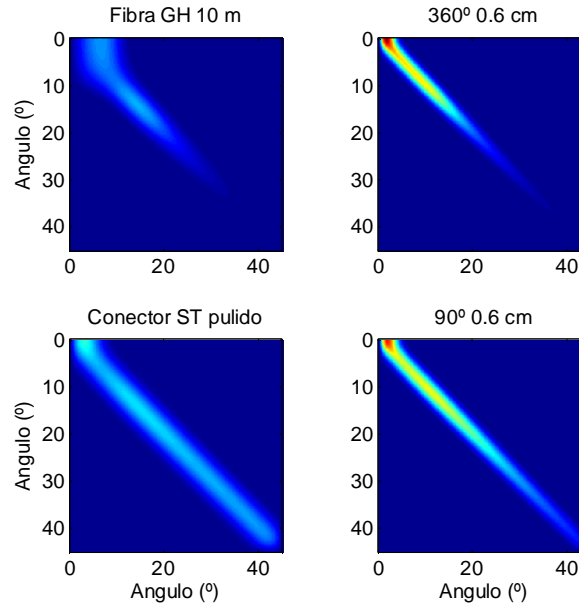


Figura 3.5 Comparación de matrices características para las curvaturas, fibra GH y conector.

Observando las matrices características puede comprobarse el fuerte efecto difusivo del conector debido al doble cambio de medio (fibra-aire y aire-fibra) acompañado de unas pérdidas altas pero bastante poco dependientes del ángulo. Por otro lado, el efecto de las curvaturas es de filtrado de ángulos altos a partir del ángulo de corte, con pocas pérdidas en los ángulos por debajo de éste y escasa difusión. Por su parte, la propagación por 10 m de fibra causa una fuerte difusión, más intensa en ángulos bajos y viene también acompañada de filtrado de potencia en ángulos altos no muy diferente de la que causan las curvaturas de 0.6 cm. La diferencia está en las mayores pérdidas que causa la fibra en todos los ángulos mientras que las de las curvaturas son más selectivas actuando como filtro paso-bajo angular.

3.3 Validación experimental

En este apartado, se realiza una validación experimental del modelo comparando los resultados de la simulación con perfiles radiales obtenidos inyectando con una fuente extensa y con medidas de las pérdidas globales de potencia.

3.3.1 Perfiles de campo lejano

En primer lugar, se comparan los perfiles radiales obtenidos a partir del campo lejano registrado inyectando luz en la fibra mediante un diodo electroluminiscente (LED), con los calculados con las matrices características de la curvatura. Para realizar estas medidas se dispone el montaje de la misma forma que se ha descrito en la metodología, pero cambiando el sistema de inyección basado en el láser colimado, por el LED, que es parte del equipo FOTEC

cuyas hojas de características figuran en el Anexo VI.4 y emite luz de una longitud de onda de $\lambda = 665 \text{ nm}$, y con una apertura numérica grande. De nuevo se utilizan fibras de 2 m de longitud, y se obtiene primero el perfil radial de referencia sin curvaturas y después, con cada uno de los diámetros analizados para 360° .

Por otra parte, con el perfil radial de referencia experimental y la matriz de la correspondiente curvatura, se calcula el perfil radial con curvatura mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{P}^{CR} = \mathbf{M}^{CR} \cdot \mathbf{P}^{REF} \quad [3.1]$$

Siendo \mathbf{P}^{REF} el vector con el perfil radial de la medida de referencia y \mathbf{M}^{CR} la matriz característica de la curvatura. En la Figura 3.6 se comparan los perfiles radiales medido y simulado para una curvatura de 360° con 1.2 cm de diámetro, que muestran un buen acuerdo.

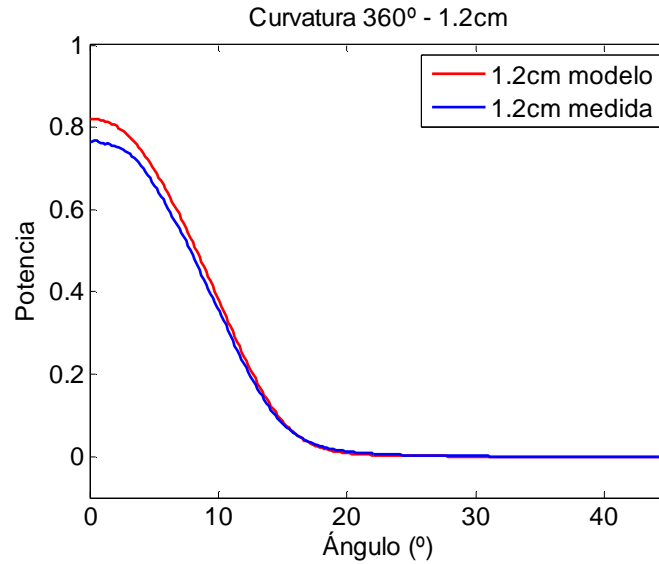


Figura 3.6 Potencias caso curvatura 360° y diámetro 1.2 cm.

3.3.2 Pérdidas en función del diámetro

También se comparan las pérdidas globales, en función del diámetro de curvatura, obtenidas experimentalmente con las obtenidas mediante simulación. Para realizar estas medidas se utiliza el mismo LED que en el apartado anterior junto con el medidor de potencia de FOTEC. Después de medir el valor de referencia con la fibra sin curvaturas, se procede a curvar la fibra 360° partiendo de un diámetro de 7 cm hasta 0.6 cm igual que en las medidas de caracterización, obteniendo la potencia recibida en cada caso. A partir de estas medidas se calculan las pérdidas por curvatura en función del diámetro de la misma. Este experimento se realizó varias veces utilizando distintos tramos de fibra, lo que ha permitido obtener el promedio y la desviación estándar.

Por otra parte, se han obtenido también las pérdidas calculando la potencia total a partir de los perfiles radiales de la siguiente forma:

$$Pot = \sum_k \mathbf{P}_k \cdot \text{sen}(k\Delta\theta) \cdot \Delta\theta \quad [3.2]$$

De esta manera, a partir de la potencia total de los perfiles simulados para cada diámetro de curvatura, Pot^{CR} y de la referencia Pot^{REF} , se calculan las pérdidas en dB como:

$$Perd = 10 \cdot \log_{10} \frac{Pot^{CR}}{Pot^{REF}} \quad [3.3]$$

En la Figura 3.7 se comparan los resultados experimentales y simulados para todos los diámetros de la curvatura de 360° . Las barras de error de las pérdidas simuladas se han estimado a partir de la potencia del perfil radial calculado, utilizando las curvas de máxima y mínima atenuación para cada diámetro.

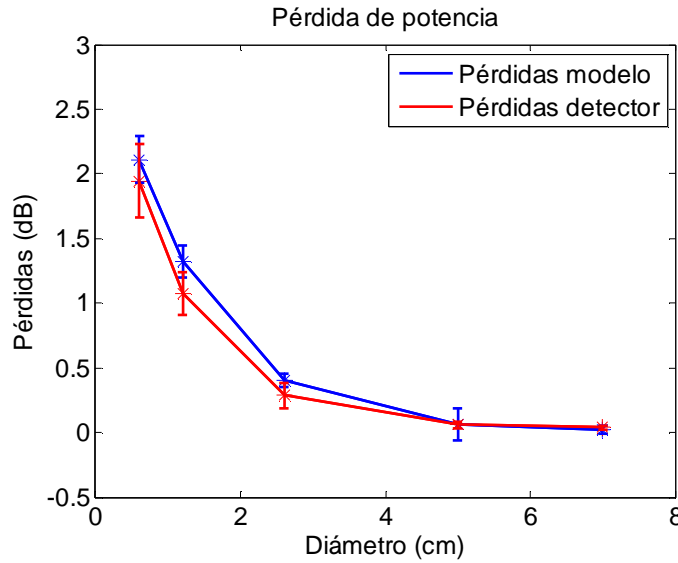


Figura 3.7 Pérdidas de potencia curvaturas 360° .

Se puede observar que las pérdidas simuladas y las experimentales siguen la misma tendencia y que sus diferencias están dentro de la desviación estándar.

3.4 Efectos de la permanencia de las curvaturas

Teniendo en cuenta que en trabajos previos se determinó que la aplicación de perturbaciones de forma prolongada altera las propiedades de la fibra de forma permanente [22], se ha procedido a realizar un estudio de la variación temporal de la atenuación y de la difusión con la curvatura de 0.6 cm de diámetro.

Así, tras realizar algunas de las series de medidas, se ha dejado la fibra instalada con la última curvatura de 0.6 cm. Después de un tiempo y sin modificar la posición de la fibra, se han vuelto a registrar barridos de FFPs obteniendo la atenuación y difusión para compararlas con la obtenida inicialmente. Este experimento se ha llevado a cabo en 3 ocasiones para curvaturas de 360° utilizando distintos tramos de fibra y con tiempos de espera de 17:30, 18 y 21 horas respectivamente, y una sola vez para 90° , esperando 68 horas. En las gráficas de la Figura 3.8 se muestran las atenuaciones obtenidas para 360° y 90° tras un tiempo de espera (línea

continua) junto con la obtenida inicialmente (línea punteada). Para poder analizar la variación, se ha representado también la atenuación promedio obtenida para 0.6 cm en cada caso.

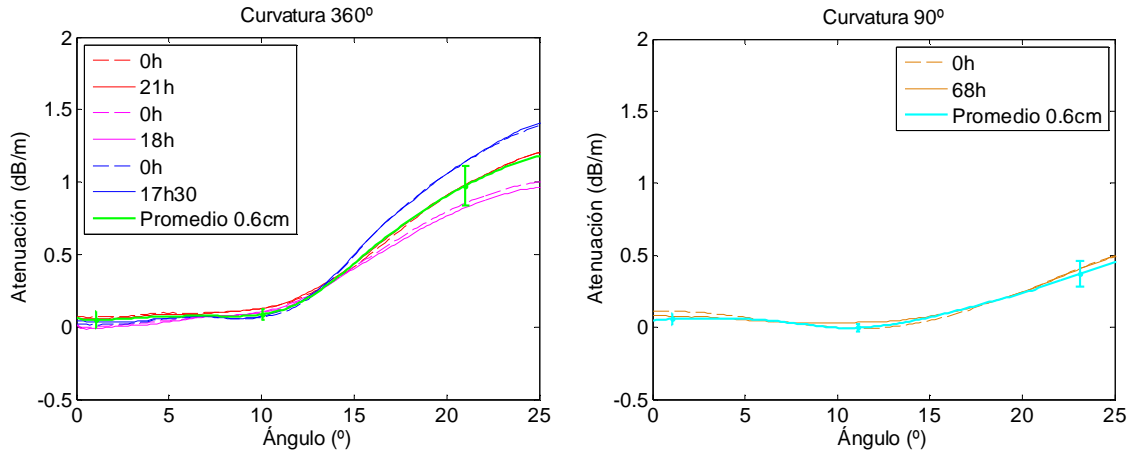


Figura 3.8 Atenuaciones para las curvaturas de 360° y 90°, diámetro 0.6 cm y permanencia.

Las gráficas muestran que la atenuación permanece prácticamente invariante en ambos casos, ya que las diferencias entre las curvas iniciales y tras el tiempo de espera son mucho menores que la variabilidad de las medidas.

En la Figura 3.9 se representan los valores del coeficiente de difusión obtenidos para todos los casos estudiados. Comparando los símbolos coloreados (difusión inicial) con los vacíos (tras un tiempo de espera), se observa en todos los casos una ligera disminución con el paso del tiempo. En la figura se han representado también, como líneas, los valores promedio obtenidos para 360° y 90°, con diámetro de 0.6 cm así como las correspondientes desviaciones estándar lo que permite determinar que esta disminución es poco significativa teniendo en cuenta la desviación estándar.

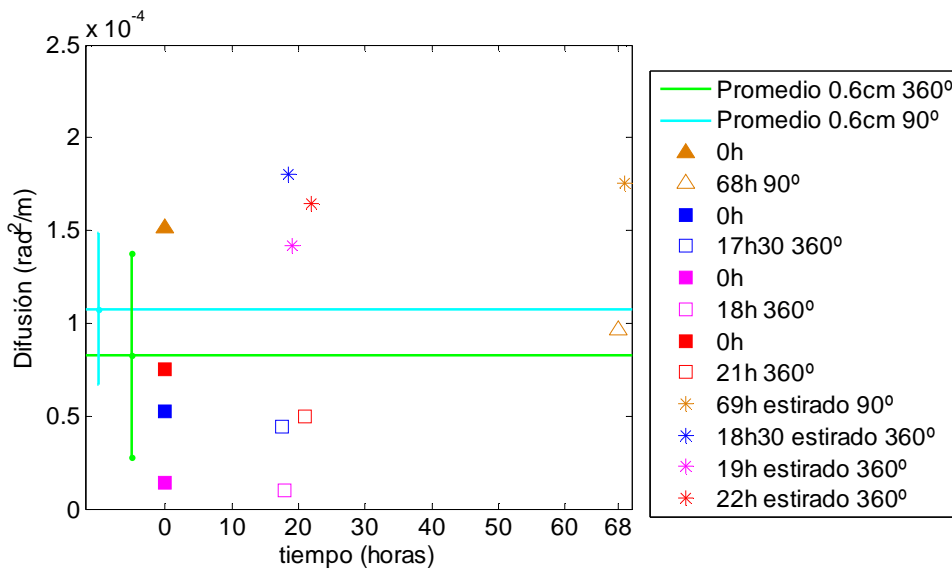


Figura 3.9 Difusiones para las curvaturas de 360° y 90°, diámetro 0.6 cm y permanencia.

En resumen, ambas figuras muestran que tanto la atenuación como la difusión tras un tiempo son similares a las obtenidas con cualquiera de las medidas realizadas para ese tamaño, por lo

que podemos decir que no hay variación significativa de las funciones características de la curvatura con el tiempo y por tanto el modelo obtenido tiene permanencia, no depende del tiempo.

Por otra parte, después de realizar estas medidas, se han obtenido de nuevo barridos de FFPs una vez desmontada la curvatura y estirada la fibra para ver si el hecho de haber estado curvada produce variaciones en sus propiedades. En la Figura 3.10 se representan las atenuaciones obtenidas en estos barridos junto con su promedio para 360° y 90°. Se representa también la atenuación característica para la curvatura de 0.6 cm en cada caso junto con la desviación estándar. Las difusiones obtenidas para cada una de estas medidas se han representado también en la Figura 3.9 para facilitar su comparación con las demás. Cada valor se ha representado con un símbolo de "estrella" con el mismo color que los valores de la serie de origen.

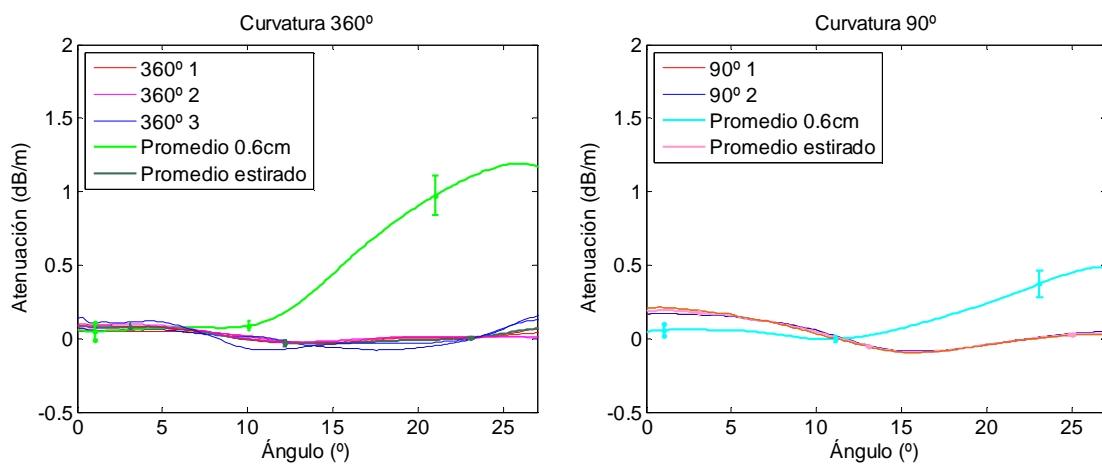


Figura 3.10 Atenuaciones estirando después de las medidas de curvaturas.

Al estirar la fibra, la forma de la atenuación ya no posee un incremento abrupto de la misma a partir del ángulo de corte, tanto en el caso de la curvatura de 360° como en el de la de 90°. Sin embargo, en los ángulos cercanos a 0° la atenuación es comparable o incluso mayor que la obtenida con la curvatura. Estas mayores pérdidas de potencia sin embargo, se compensan favoreciendo la propagación de potencia en ángulos intermedios que muestran valores bajos o, en algunos casos, negativos. Como ya se explicó en el capítulo anterior, el hecho de que la atenuación sea positiva, hay que interpretarlo como un aumento de potencia óptica propagada en ciertos ángulos respecto de la que se propaga en la fibra recta que se utilizó como referencia.

Por otra parte, la difusión obtenida una vez estirada la fibra es incluso mayor que la obtenida con la curvatura de 0.6 cm de diámetro (Figura 3.9). Este aumento es sistemático (ocurre en todos los casos testeados) y su magnitud es mayor que la desviación estándar lo que indica que se trata de un efecto significativo.

Estas variaciones, tanto en la atenuación como en la difusión, que se producen al estirar la fibra después de haber estado curvada son consistentes con lo observado en un trabajo en el que se expuso a las fibras a curvaturas continuadas a lo largo de toda su longitud lo cual modificó sus propiedades de transmisión [22]. Estos cambios en la atenuación y difusión se

podrían explicar si al estirar la fibra después de un tiempo en una curvatura forzada, se producen pequeñas fracturas que favorecen una mayor transferencia de potencia, que daría lugar tanto a un mayor parámetro de difusión como a variación en la cantidad de potencia propagada en distintos ángulos.

En resumen, se puede concluir que una fibra que ha estado un cierto tiempo sometida a curvaturas queda “marcada” y que hay que tener precaución si se ha de utilizar de nuevo después de estirla. Estos resultados justifican la precaución tomada al diseñar el protocolo de medida siguiendo un orden decreciente de diámetros de curvatura.

3.5 Caracterización de curvaturas en entornos realistas

En la instalación de una red doméstica es frecuente que para instalar la fibra haya que rodear salientes y salvar esquinas. Por ello, además de caracterizar curvaturas de 90° con la torre de curvaturas, se han realizado medidas con un montaje que introduce curvaturas de 90° más similares a las necesarias en un entorno real. De esta forma, se ha utilizado un bloque en “L” para instalar la fibra y reproducir “esquinas” tanto internas como externas, mostrado en las fotografías de la Figura 3.11, siendo las internas aquellas en las que la fibra está en la parte interior de un ángulo de 90° que forman dos paredes, y las externas, aquellas en las que la fibra debe rodear un saliente de forma que se encuentra en la parte exterior del mismo ángulo.

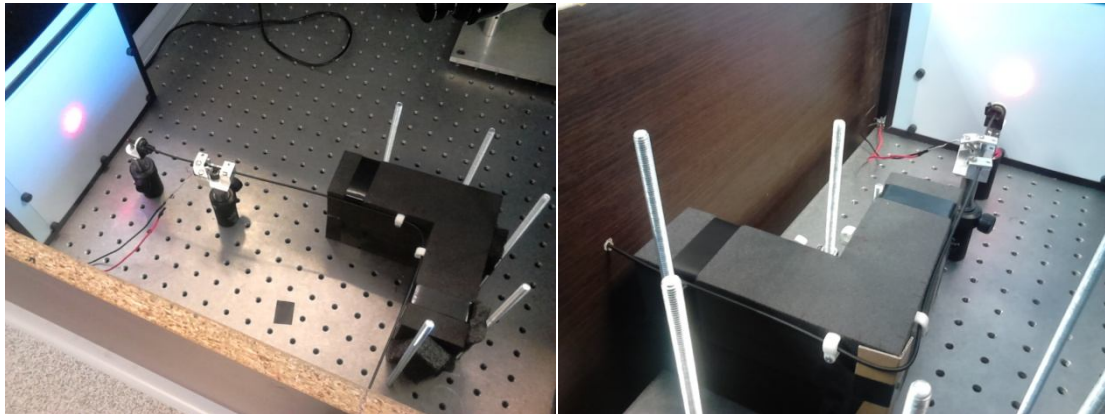


Figura 3.11 Fotografías de la instalación de esquinas interna y externa.

Para su caracterización se procede de la misma forma descrita en la metodología, obteniendo la atenuación y difusión a partir del promedio de varias medidas de cada tipo. En la Figura 3.12 se representan las atenuaciones y difusiones obtenidas para las esquinas interna y externa junto con las obtenidas con la torre para 90° con distintos diámetros.

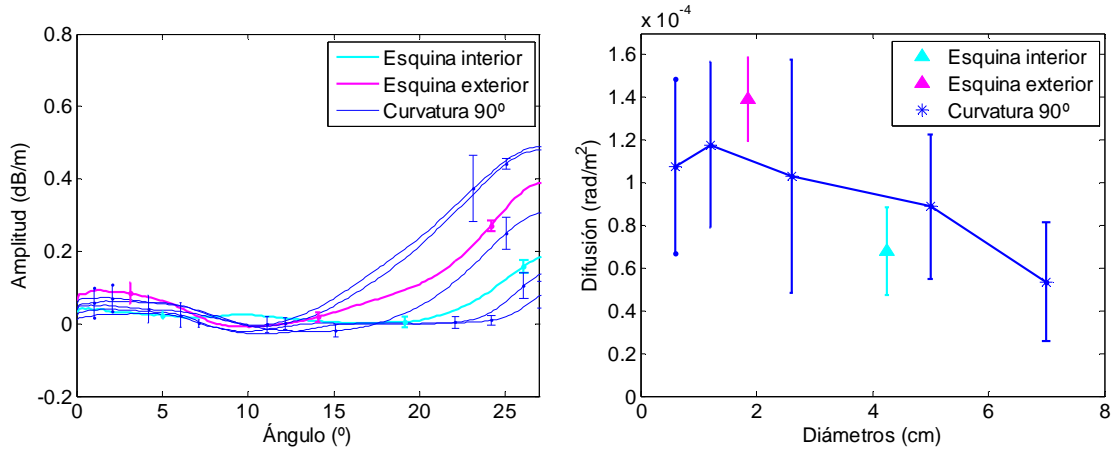


Figura 3.12 Atenuaciones y difusiones para las curvaturas estudiadas y las esquinas.

Se observa que la forma de las curvas de atenuación obtenidas para la esquina interna y externa es similar a la de las obtenidas con la torre de curvaturas. Teniendo en cuenta su posición relativa a los diámetros caracterizados, el diámetro de curvatura de la esquina externa se correspondería con 1.85 cm y el de la interna, algo mayor, con 4.25 cm. Los valores de la difusión se han representado en la gráfica en la posición correspondiente a estos diámetros. Aunque parezca que están alejados de los puntos de difusión de las curvaturas, están dentro de la desviación estándar de las diferentes medidas. El diámetro de curvatura exacto que sigue la fibra al instalarla en una esquina de este tipo depende de cómo y dónde se pongan las sujeciones o grapas que, por otra parte, también ejercen una presión sobre la fibra que puede modificar sus propiedades de transmisión. En el caso estudiado se situaron a 3 cm del ángulo de la esquina en ambos casos. La esquina interna, cuanto más lejos del ángulo está sujeto, mayor amplitud tiene y por ello se ven los resultados como una curvatura de diámetro mayor.

Como consecuencia de lo anterior, se desprende la necesidad de tener un modelo más general y no restringido a una serie de diámetros de curvatura concretos como los que hemos caracterizado. Además, hemos determinado que la forma de la atenuación sigue un patrón similar para todas las curvaturas y que para distintas condiciones sólo cambian unos parámetros característicos como son el ángulo de corte, la pendiente, etc. Por ello, en el siguiente capítulo se aborda el objetivo de obtener una función genérica para modelar la atenuación de 360° y 90° para cualquier diámetro de curvatura a partir de unas funciones analíticas que modelen sus parámetros característicos.

Capítulo 4: MODELO ANALÍTICO Y SIMULACIÓN EN ENTORNO REAL

En general, las curvaturas que aparecen en entornos reales no tienen valores fijos de diámetro sino que pueden tomar cualquier valor dependiendo de la configuración de dicho entorno o de la forma de instalación de la fibra. Por ello, sería deseable poder calcular la matriz característica para curvaturas de cualquier diámetro dentro de un rango de valores razonable. Así pues, en este capítulo se desarrolla un modelo analítico para calcular las funciones de atenuación y el parámetro de difusión para curvaturas de 360° y 90° con cualquier diámetro de curvatura entre 0.55 y 10 cm. Ello permite calcular la matriz característica de las curvaturas dentro de este rango de diámetros. Además, para verificar su utilidad práctica, se ha introducido este modelo en una primera implementación del modelo matricial de POF y se ha aplicado en la simulación de un ejemplo sencillo, que permite ver las consecuencias que tiene la presencia de curvaturas en diversos puntos de una red para la capacidad de transmisión.

4.1 Modelo analítico de la matriz de curvaturas

4.1.1 Parametrización de la atenuación y difusión en función del diámetro de curvatura

En primer lugar, se han determinado las características de la curva de atenuación que varían con el diámetro de la curvatura: el nivel inicial de atenuación, el ángulo de corte y la pendiente a partir de este ángulo, cuyos valores se han extraído de las funciones de atenuación obtenidas en el capítulo anterior. Su variación se ha modelado con funciones del diámetro, añadiendo una cuarta función para modelar la difusión. Estas cuatro funciones se han ajustado con una serie de parámetros que son distintos para 360° y 90°. Con todo ello, se puede obtener la matriz característica para cualquier curvatura de diámetro entre 0.55 y 10 cm.

En el capítulo anterior se ha visto como la forma de la función de atenuación es relativamente plana hasta llegar al ángulo de corte a partir del cual aumenta con una determinada pendiente de atenuación. Por ello, se ha elegido la siguiente función para representar su forma:

$$\alpha^{CR}(\theta, \phi) = N(\phi) + P(\phi) \frac{\theta - \theta_0(\phi)}{1 + 0.5e^{-1.2(\theta - \theta_0(\phi))}} \quad [4.1]$$

donde $N(\phi)$ es el nivel de atenuación en ángulos bajos, $\theta_0(\phi)$ el ángulo de corte y $P(\phi)$ es la pendiente, son todas ellas funciones del diámetro de curvatura. Los valores de estas características extraídas de las curvas de atenuación promedio del capítulo anterior, se representan en función del diámetro para ambas curvaturas en la Figura 4.1.

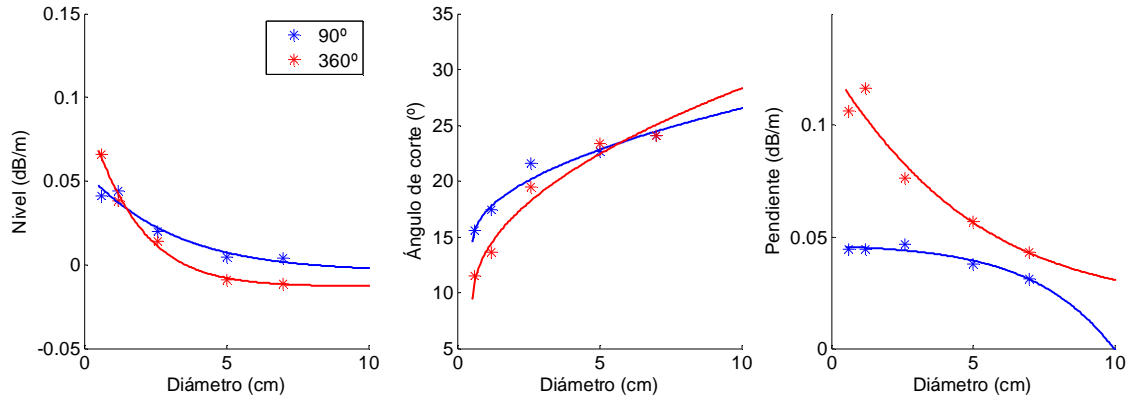


Figura 4.1 Niveles, ángulos de corte y pendientes con curvas de ajuste de las curvaturas 360° y 90°.

Como puede verse, la variación de estas tres características no es lineal con el diámetro, de forma que se postulan las diferentes funciones para modelar las variaciones respectivas del nivel, ángulo de corte y pendiente de la atenuación, y la difusión.

En el caso del nivel, su variación se modela con la siguiente función de 3 parámetros:

$$N(\phi) = N_0 + \frac{1}{1+n_1 e^{-n_2 \cdot \phi}} \quad [4.2]$$

En el caso del ángulo de corte se modela su variación con la parábola horizontal siguiente, ajustando 2 parámetros:

$$\theta_0(\phi) = 2\sqrt{p\left(\phi - \frac{1}{2}\right)} + k \quad [4.3]$$

Finalmente, la pendiente se modela con la siguiente función del diámetro dependiente de 3 parámetros:

$$P(\phi) = P_0 + \frac{1}{1+p_1 e^{-p_2 \cdot \phi}} \quad [4.4]$$

En resumen, la atenuación angular se puede modelar con 8 parámetros, cuyos valores se han obtenido mediante ajustes de cada una de las funciones anteriores a las características extraídas de las curvas de atenuación. Las funciones calculadas con estos parámetros, que se listan en las Tabla 4.1, Tabla 4.2 y Tabla 4.3, se representan en la figura anterior junto con los valores del nivel, ángulo de corte y pendiente experimentales. Puede verse que estas funciones capturan la tendencia de variación de las tres características, aunque hay puntos concretos que se alejan de dicha función. En realidad, no se trata de que el ajuste se adapte a los valores obtenidos, sino que represente su tendencia de variación.

$N(\phi)$ [dB/m]	N_0 [dB/m]	n_1 [m/dB]	n_2 [°]
360°	-0.0299	3.1144	0.6584
90°	-0.0093	6.2244	0.3567

Tabla 4.1 Valores de los parámetros de las funciones de nivel para 360° y 90°.

$\theta_0(\phi)$ [°]	p [°]	k [°]
360°	9.3570	9.5043
90°	3.7304	14.6445

Tabla 4.2 Valores de los parámetros de las funciones de los ángulos de corte para 360° y 90°.

$P(\phi)$ [dB/m/°]	P_0 [dB/m/°]	p_1 [° m/dB]	p_2 [°]
360°	0.0449	3.0913	0.2492
90°	-0.8620	0.0025	0.3881

Tabla 4.3 Valores de los parámetros de las funciones de la pendiente para 360° y 90°.

En la siguiente figura, se representa la función de atenuación obtenida introduciendo los valores de los parámetros de las tablas en las expresiones [4.2] a [4.4], y las funciones obtenidas se introducen en la expresión [4.1] para 5 diámetros diferentes.

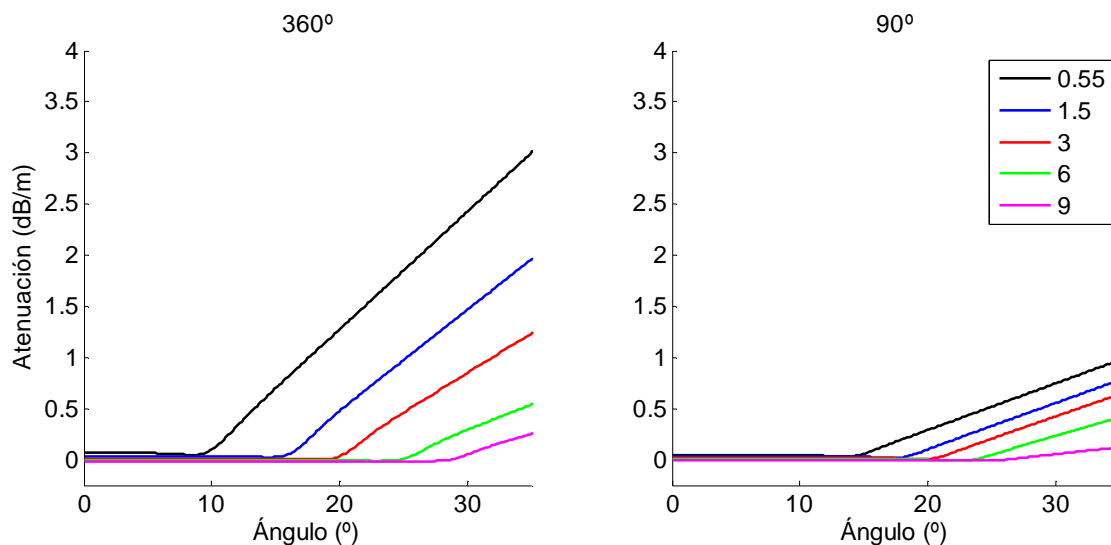


Figura 4.2 Atenuaciones y difusiones para x diámetros diferentes.

Se puede observar que las curvas obtenidas con el modelo analítico son similares a las experimentales presentadas en el capítulo anterior.

El parámetro de difusión también se ha modelado mediante una función con 4 parámetros de ajuste:

$$D(\phi) = D_0 + \frac{d_1}{1+d_2 e^{(\phi-d_4)}} \quad [4.5]$$

Estos 4 parámetros se han ajustado a los valores experimentales de 360° y 90° obteniendo los valores que muestra la Tabla 4.4:

$D(\phi)$ [rad ² /m]	D_0 [rad ² /m]	d_1 [rad ² /m]	d_2	d_4 [°]
360°	1.3636E-05	7.7854E-05	0.0412	1.2064
90°	3.6140E-05	7.4908E-05	0.0226	2.0297

Tabla 4.4 Valores de los parámetros de las funciones de difusión para 360° y 90°.

En la Figura 4.3 se representan las funciones de ajuste de las difusiones para las dos curvaturas, junto con los valores experimentales obtenidos en el capítulo anterior.

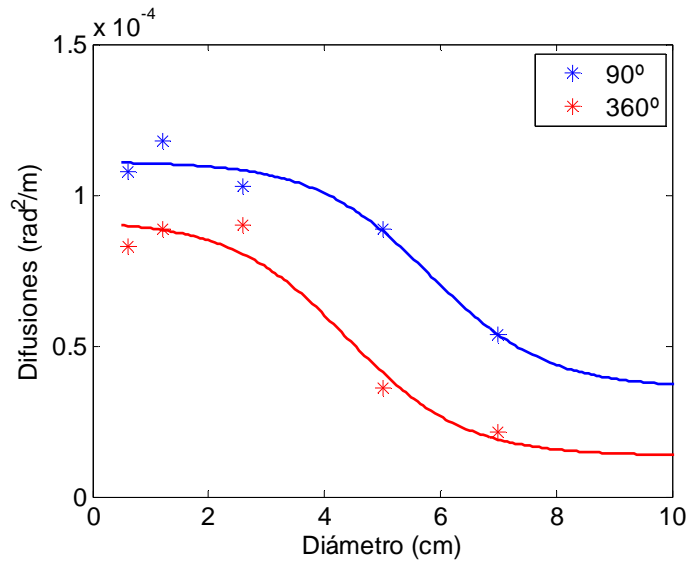


Figura 4.3 Difusiones con las curvas de ajuste para las dos curvaturas.

4.1.2 Matrices características

Con las funciones definidas y el conjunto de parámetros determinados en el apartado anterior, se pueden calcular las matrices características para cualquier valor intermedio del diámetro e incluso, extrapolar para valores algo menores y mayores que los caracterizados experimentalmente. En la siguiente figura se representan como ejemplo, varias matrices obtenidas con el modelo analítico. Para ilustrar la validez del modelo se muestra la matriz para

el diámetro de 5 cm, que también se ha caracterizado experimentalmente, junto con otras cuyos diámetros son diferentes (0.55 cm, 1 cm, y 2.5 cm). Puede verse que estas matrices siguen las mismas tendencias observadas en las que se mostraron en el capítulo anterior y que fueron calculadas con las funciones de atenuación y difusión experimentales.

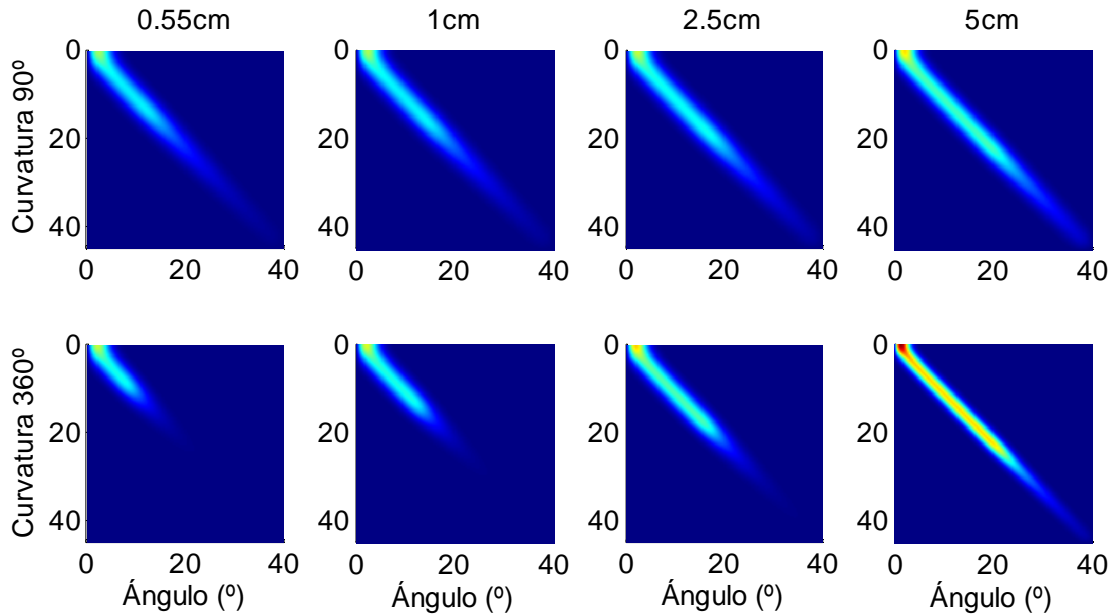


Figura 4.4 Matrices características para curvaturas de 90° y 360°.

4.2 Efectos de las curvaturas en un enlace de fibra óptica

El objetivo de obtener un modelo matricial de curvaturas es poder incorporar una nueva herramienta al entorno de modelización de fibras de plástico y componentes basado en matrices, desarrollado en el grupo de POF (Anexo VI.1). Para ilustrar la inserción de este nuevo bloque en dicho entorno, se ha elegido un ejemplo de red muy simple en el que se va a analizar el efecto de las curvaturas comparando sus efectos para distintas fuentes ópticas y en distintas posiciones de la red. Los esquemas implementados se presentan en la Figura 4.5. Se obtendrán resultados para dos fuentes de aperturas distintas y curvaturas en 2 posiciones diferentes, una cercana al emisor (a) y otra cercana al detector (c). Se calcula también la configuración (b), sin curvaturas, para establecer una referencia en la comparación.

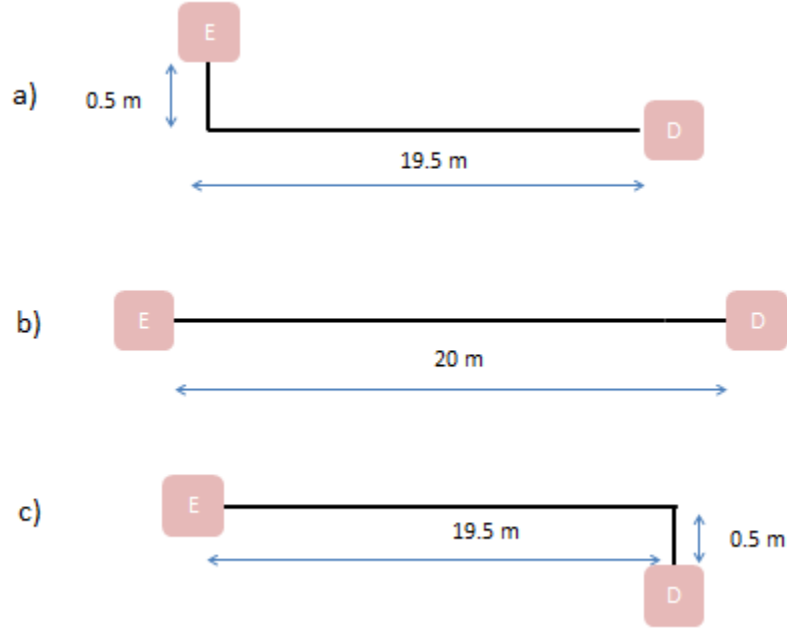


Figura 4.5 Esquemas de red de fibra óptica de plástico con curvaturas.

En el entorno de simulación tanto la fibra de distintas longitudes como las curvaturas se modelan mediante matrices [2]. En realidad, la fibra se modela por una colección de matrices, una para cada frecuencia, de forma que permite la obtención de la función de transferencia [9]. La simulación de los esquemas de red de la figura mediante el modelo matricial corresponde a la implementación de las siguientes ecuaciones:

$$a) \quad \mathbf{P}_D(\omega) = \mathbf{M}_{19.5m}(\omega) \cdot \mathbf{M}^{CR} \cdot \mathbf{M}_{0.5m}(\omega) \cdot \mathbf{P}_E(\omega) \quad [4.6]$$

$$b) \quad \mathbf{P}_D(\omega) = \mathbf{M}_{20m}(\omega) \cdot \mathbf{P}_E(\omega) \quad [4.7]$$

$$c) \quad \mathbf{P}_D(\omega) = \mathbf{M}_{0.5m}(\omega) \cdot \mathbf{M}^{CR} \cdot \mathbf{M}_{19.5m}(\omega) \cdot \mathbf{P}_E(\omega) \quad [4.8]$$

Donde $\mathbf{P}_E(\omega)$ es una matriz con la distribución espacio-frecuencial de la fuente y $\mathbf{P}_D(\omega)$ es esta distribución en el detector, tras propagarse por la fibra y el resto de elementos, en este caso, las curvaturas. De la matriz $\mathbf{P}_D(\omega)$ se puede obtener tanto información espacial (por ejemplo, el perfil del campo lejano) como frecuencial (respuesta en frecuencia de la configuración) de la forma descrita en el Anexo III. En la Figura 4.6 se presenta el módulo de la respuesta en frecuencia obtenida para las 3 configuraciones y con cada una de las fuentes consideradas: un LED modelado con una Gaussiana con sigma 30° y un VCSEL cuya sigma es 10°. La “esquina externa” se ha simulado mediante una curvatura de 90° de diámetro 1.85 cm que corresponde al estimado como más próximo para la medida con el bloque en “L” mostrada en el capítulo anterior.

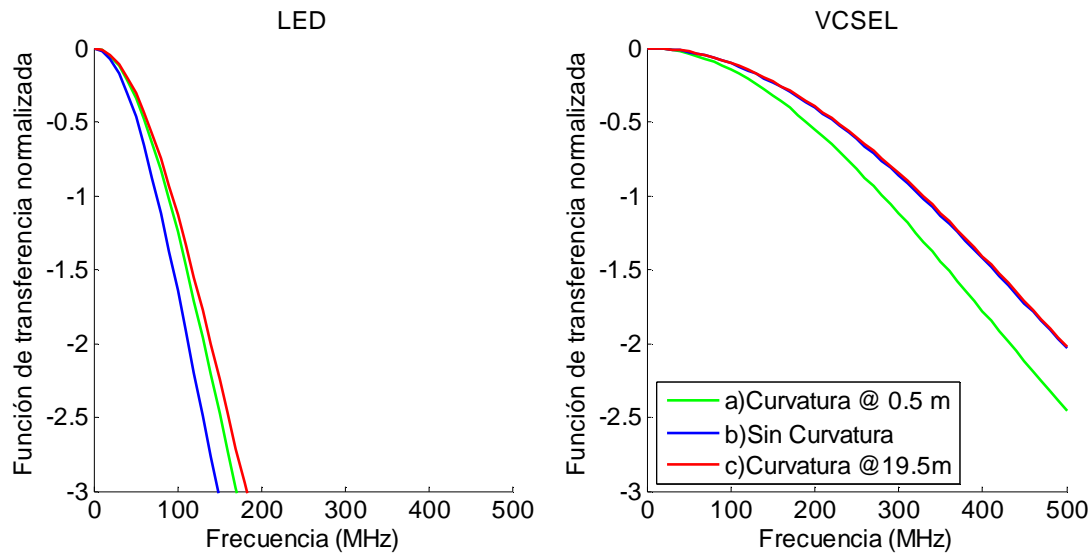


Figura 4.6 Respuesta en frecuencia de varias configuraciones con emisor LED y VCSEL.

Se observa que con la fuente más extensa la respuesta en frecuencia mejora con la curvatura en cualquier posición, lo que es esperable, ya que con esta fuente la curvatura realiza un filtrado de potencia en los ángulos altos, que son los que han sufrido mayores retardos contribuyendo más a la degradación de la señal en el detector. La mejora en el ancho de banda a 3 dB, es mayor cuando la curvatura está próxima al detector. Sin embargo, para el VCSEL sólo se observa una mínima mejora con la curvatura cerca del detector mientras que cuando la curvatura está al principio del enlace, se degrada la transmisión respecto del caso sin curvaturas. En este caso, la difusión que introduce la curvatura cerca del emisor produce una transferencia de potencia a ángulos altos que acumulan mayores retardos en su propagación, debido al tramo restante de fibra respecto a las otras dos configuraciones. Este comportamiento es similar al observado con otros dispositivos [3, 15]. La pérdida de potencia en la curvatura para el caso del LED es de 0.71 dB (curvatura próxima al emisor) y 0.77 dB (próxima al detector), y para el caso del VCSEL 0.31 dB y 0.30 dB respectivamente, lo que nos sugiere las mismas conclusiones: para el caso del VCSEL apenas hay diferencias entre poner la curvatura en un extremo o en otro, mientras que en los casos del LED hay más diferencia.

Teniendo en cuenta que el mayor impacto de las curvaturas es para el caso de la fuente extensa, se ha calculado para este caso la pérdida de potencia y el incremento del ancho de banda para ambas curvaturas (360° y 90°) en función del diámetro de forma que se pueda establecer un compromiso para determinar qué diámetro es más favorable en cada configuración. En la Figura 4.7 se pueden ver los resultados para un rango de 1 a 9 cm de diámetro para 360° y 90°.

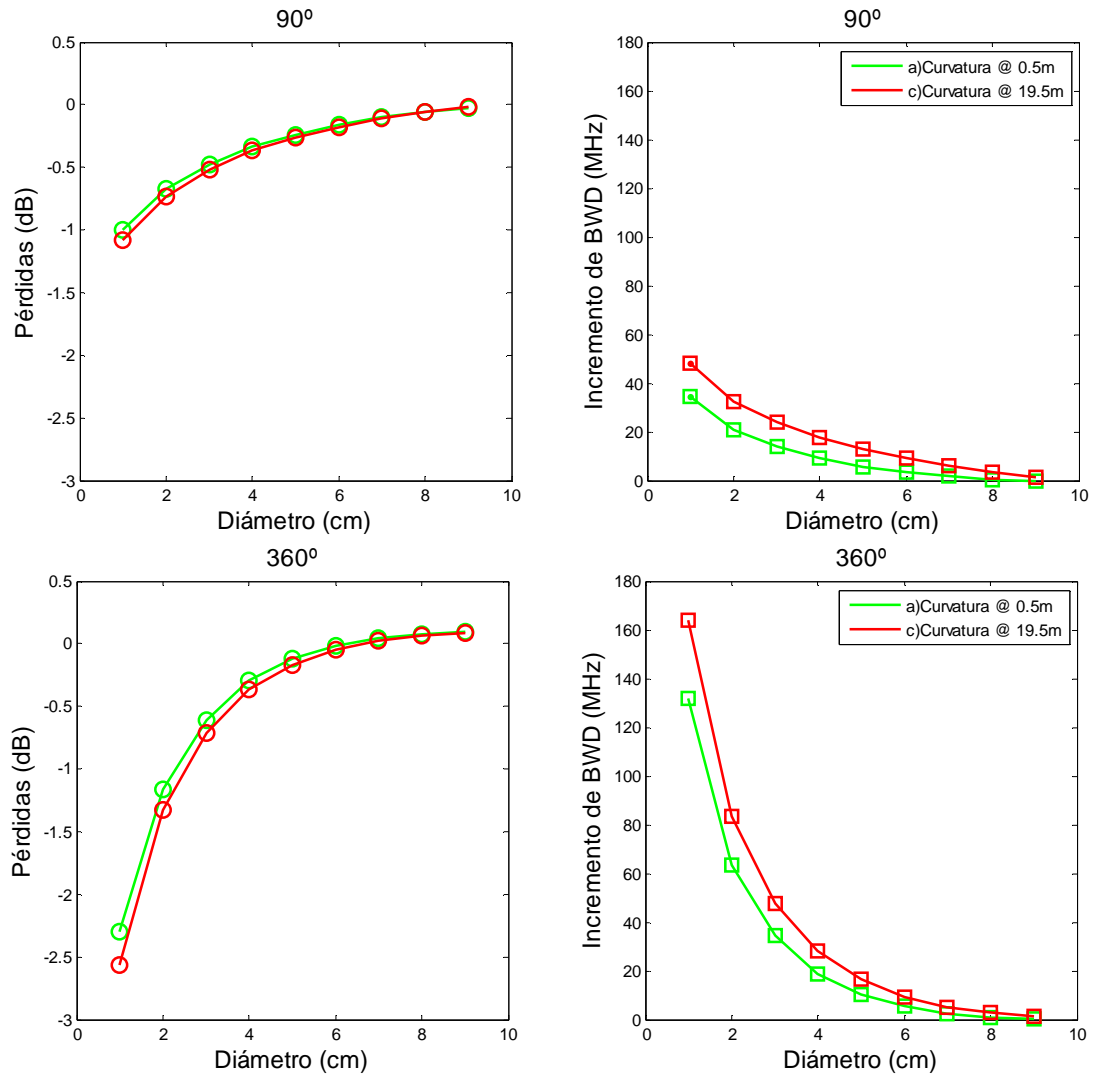


Figura 4.7 Pérdidas e incremento de ancho de banda para las dos configuraciones y curvaturas.

Las figuras confirman lo obtenido para el caso particular de 1.85 cm y 90°: una mejora del ancho de banda en presencia de curvaturas, que es mayor cuando la curvatura está próxima al detector. Como contrapartida, en este caso también se obtienen mayores pérdidas de potencia. Tanto el aumento del ancho de banda como las pérdidas aumentan al disminuir el diámetro de la curvatura y son considerablemente mayores para 360° que para 90°.

En el caso de las curvaturas de 90°, las pérdidas máximas de potencia no son demasiado altas ya que para 1 cm son aproximadamente de 1 dB y, además, van acompañadas de un aumento del ancho de banda entre 34 MHz (cerca de la fuente) y 48 MHz (cerca del detector). En el caso de 360°, la mejora del ancho de banda es mucho mayor, superando los 100 MHz para curvaturas de diámetro menor que 1.5 cm. En contrapartida, esta mejora va acompañada de pérdidas mayores que, por debajo de diámetros de 2 cm aumentan exponencialmente.

Por tanto, aunque lo razonable es evitar las curvaturas y en particular aquellas de diámetro menor de 2 cm, se puede buscar un compromiso entre las pérdidas tolerables en un determinado enlace y el ancho de banda requerido. En cualquier caso, siempre será más favorable planificar la red para que las curvaturas necesarias estén más próximas al detector que al emisor, independientemente de cuál sea éste.

Capítulo 5: CONCLUSIONES

5.1 Aportaciones del PFC y valoración del trabajo

En este proyecto, se han caracterizado los efectos de las curvaturas de pequeño radio en fibras ópticas de plástico mediante una matriz, utilizando un método basado en datos experimentales.

Tanto el sistema experimental como el protocolo de medida, se han modificado convenientemente para adaptarse al problema particular de caracterización de pequeñas curvaturas de vuelta completa (360°) y cuarto de vuelta (90°).

A partir de los datos experimentales, se han obtenido la función de atenuación angular y la difusión para 5 radios de curvatura desde 0.6 a 7 cm, con los dos tipos de curvatura utilizando el procedimiento que ya se había utilizado con éxito con otras perturbaciones localizadas. Se ha analizado, además, la variabilidad de estas estimaciones y el impacto sobre ellas de factores como el signo de la curvatura.

Con estas dos funciones, se han calculado las matrices características correspondientes a las curvaturas analizadas y que permiten predecir los efectos de las mismas; como se ha verificado obteniendo perfiles radiales y pérdidas globales experimentales y comparándolos con los calculados usando el modelo.

Los resultados revelan que el efecto de las curvaturas es fundamentalmente un filtrado de la potencia óptica a partir de un ángulo característico para cada diámetro. Este ángulo de corte toma valores más altos cuanto mayor es el diámetro de curvatura y para el mismo diámetro, es mayor para 90° que para 360° . Por debajo de este ángulo, la atenuación es relativamente baja. Por otra parte, los coeficientes de difusión toman valores bastante pequeños si se comparan con los producidos por conectores o por la propia fibra.

Se ha comprobado que las funciones características de las curvaturas que hemos determinado, apenas tienen variación con el tiempo siempre que se mantengan fijas. Sin embargo, si se suelta la curvatura y se estira la fibra, permanece una atenuación residual y aumenta la difusión respecto a la que había antes de aplicar la curvatura, por lo que se concluye que no es conveniente reutilizar fibras que ya hayan sido instaladas.

Con el objetivo de integrar el modelo de curvaturas como una nueva herramienta dentro del modelo matricial de fibra de plástico y componentes desarrollado por el grupo de POF, se han diseñado unas funciones analíticas que, con unos parámetros hallados, permiten la obtención de la función de atenuación y del parámetro de difusión para curvaturas de 90° y 360° con cualquier valor de diámetro comprendido entre 0.55 cm y 10 cm. Se han programado las rutinas necesarias para añadir un bloque que permite simular curvaturas en este entorno.

Finalmente, utilizando este nuevo bloque integrado en el entorno de simulación de POF, se ha estudiado el efecto de las curvaturas en un escenario sencillo comparando sus efectos para distintas fuentes ópticas y en distintas posiciones de la red. Las conclusiones obtenidas no son más que una muestra del potencial de la herramienta desarrollada dentro del marco de los entornos de simulación de redes, que son indispensables para la aplicación de la fibra de plástico como medio en redes de corto alcance, tal como redes domésticas o redes dentro del avión.

5.2 Continuación y ampliación del trabajo

Entre las tareas de continuación de este trabajo se procederá a la integración del modelo de curvaturas como "toolbox" en el entorno de simulación Simulink® en el cual ya se han implementado el modelo matricial de fibra y algunos componentes, así como en el software específico de simulación óptica OptSim™ y que permite obtener una mayor información de la señal óptica propagada como BER, diagramas de ojo, etc..

Una tarea importante es comprobar que el modelo analítico desarrollado a partir de medidas en fibra GH de Mitsubishi es capaz también de representar los efectos de las curvaturas sobre fibras de otros fabricantes, ya que en el caso de los conectores se observaron diferencias para fibras de distintos fabricantes.

En este proyecto se han analizado las curvaturas de 360° y 90°, pero también se podría aplicar la misma metodología para ver los efectos de las de 180° y 270° que, si bien presentan menos interés práctico, pueden ayudar a una mejor comprensión de la forma de propagación en estas fibras.

Por otra parte, sólo se han caracterizado curvaturas aisladas y con sólo una vuelta, por lo que habría que cuantificar el efecto de varias vueltas sobre la distribución de potencia, así como evaluar distintas configuraciones combinando distintos signos de curvaturas o tramos rectos y curvaturas.

Además, se ha observado que las curvaturas de radios grandes (mayores de 50 cm), como las que sufre la fibra al estar enrollada en un carrete, causan también cambios en la propagación favoreciendo mayor potencia en algunos ángulos, por lo que su caracterización sobre todo en cuanto a los efectos de permanencia es también relevante.

En esta misma línea, se puede abordar la caracterización de las curvaturas en fibras de plástico multi-núcleo, cuyo punto fuerte es su inmunidad ante curvaturas y que están suscitando interés para aplicaciones en redes aviónicas.

Bibliografía y Referencias

1. J. Mateo, M.A. Losada, I. Garcés, J. Zubia, "Global characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers", *Optics Express*, Vol. 14, No. 20, 9028-9035, (2006).
2. J. Mateo, M. A. Losada, A. López, "Modeling of Polymer Optical Fibers", in *Communication in Transportation Systems*, Otto Strobel, Ed. IGI Global, Feb. 2013, ch. 4.
3. M. A. Losada, J. Mateo & J. J. Martínez Muro, "Assessment of the impact of localized disturbances on SI-POF transmission using a matrix propagation model", *IOP Journal of Optics*, Vol. 13, 055406 (6pp), (Marzo 2011).
4. M.A. Losada, J. Mateo, A. López, N. Antoniadis, D. Richards, "Challenges in the Integration of Plastic Optical Fibre Technology in Aircrafts", in *Proceedings of 14th International Conference on Transparent Optical Networks*, Warwick University, Coventry (UK), (6/2012).
5. M. A. Losada, J. Mateo "Short-Range (in-building) Systems and Networks: A Chance for Plastic Optical Fibers", in *WDM Systems and Networks: Modeling, Simulation, Design and Engineering*, N. Antoniadis, G. Ellinas, I. Roudas, Eds. New York: Springer, Dec. 2011, ch. 7.
6. J. Mateo, M.A. Losada, I. Garcés, J. Zubia, "Design and implementation of custom MOST ring network prototypes", in *Proceedings of the 15th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, 456-461, Seoul (Corea), (09/2006).
7. M.A. Losada, J. Mateo, D. Espinosa, I. Garcés and J. Zubia, "Characterisation of the far field pattern for plastic optical fibers", in *Proceedings of the 13th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, pp458-465, Nuremberg (Alemania), (09/2004).
8. J. Mateo, M.A. Losada, J.J. Martínez-Muro, I. Garcés, J. Zubia, "Bandwidth measurement in POF based on general purpose equipment", in *Proceedings of the 14th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, Honk-Kong (China), (09/2005).
9. J. Mateo, M.A. Losada, J. Zubia, "Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation", *Optics Express*, Vol. 17, No. 4, 2850-2860, (2009).
10. O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum, "POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems", 2nd Ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2008).
11. D. Richards, M.A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, and N. Madamopoulos, "Modeling Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 31, No. 3, 468 (8pp), (02/2013).

12. A. López, M.A. Losada, J. Mateo, "Simulation framework for POF-based communication systems", in *Proceedings of the 17th International Conference on Transparent Optical Networks*, Budapest (Hungria), (07/2015).
13. A. Alcoceba, A. López, M. A. Losada, J. Mateo, C. Vázquez, "Building a simulation framework for POF data links", in *Proceedings of the 24th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, Nurnberg (Alemania), (09/2015).
14. A. Flor, A. López, D. Richards, M. A. Losada, J. Mateo, J. Zubia, "Performance of electronic equalization techniques applied to POF links", in *Proceedings of the 24th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, Nurnberg (Alemania), (09/2015).
15. A. Esteban, M. A. Losada, "Análisis de los efectos de conectores sobre las propiedades de transmisión de fibras ópticas de plástico", Proyecto Final de Carrera, Ingeniería de Telecomunicaciones, Zaragoza: s.n., (2011).
16. Gaizka Durana, Joseba Zubia, Jon Arrue, Gotzon Aldabaldetrekue, and Javier Mateo, "Dependence of bending losses on cladding thickness in plastic optical fibers", *APPLIED OPTICS*, Vol. 42, No. 6, 20, 997-1002, (2003).
17. Gloge, D., "Optical power flow in multimode fibers", *Bell Syst.Tech. J.*, 51(8), 1767-1783, (1972).
18. M. S. Kovacevic´ and D. Nikezic, "Influence of bending on power distribution in step-index plastic optical fibers and the calculation of bending loss", *APPLIED OPTICS*, Vol. 45, No. 26, , 6675-6681, (2006).
19. F. A. Domínguez, M. A. Losada, "Análisis de pérdidas en conectores para fibras de plástico", Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Zaragoza: s.n., (2014).
20. M. Chueca, M. A. Losada, "Desarrollo de un sistema experimental para medidas de campo cercano en fibras ópticas de plástico multinúcleo", Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Zaragoza: s.n., (2015).
21. M.A. Losada, I.Garcés (Member), J. Mateo, I. Salinas, J. Lou & J. Zubía, "Mode coupling contribution to radiation losses in curvatures for high and low numerical aperture plastic optical fibers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 20, No. 7, 1160-1164, (2002).
22. M.A. Losada, J. Mateo, I. Garcés, J. Zubía, J.A. Casao, and P. Pérez-Vela, "Analysis of strained plastic optical fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 6, 1513-1515, (2004).
23. *Fiber Cutter*, Disponible en: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=110&cat=cutting> (Accedido: Octubre 2014).
24. *Micro-Strip™ precisión stripper*, Disponible en: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=330&cat=stripping> (Accedido: Octubre 2014).

25. *Fiber Polishing Kit*, Disponible en: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=10&cat=kits> (Accedido: Octubre 2014).
26. *Slurry, Polishing*, Disponible en: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=450&cat=polishing> (Accedido: Octubre 2014).
27. *Puck, Polishing Plastic ST*, Disponible en: <http://i-fiberoptics.com/tool-detail.php?id=409&cat=polishing> (Accedido: Octubre 2014).
28. *Fibra Eska™ Mitsubishi GH-4001*, Disponible en: <http://i-fiberoptics.com/fiber-detail.php?id=47&sum=80> (Accedido: Octubre 2014).
29. *Cámara QICAM FAST 139*, Disponible en: http://www.qimaging.com/products/cameras/scientific/qicam_fast.php (Accedido: Octubre 2014).
30. *FOTEC T570*, Disponible en: <http://www.navicpmart.com/advice/advicetmp.cfm/s/ECCD83451F913030E040000A6F1439F1491545165/v/001~~.%2Fsearch%2Farchivespec.cfm~~CABLFO~~FOTEC~~T570~~%20~~%20|1~~.html> (Accedido: Marzo 2015).

CARACTERIZACIÓN MATRICIAL DE LAS CURVATURAS EN FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO

ANEXOS

Anexo I: FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO

Las fibras de plástico se caracterizan porque su atenuación y dispersión modal es mucho mayor que las que presentan las fibras de vidrio, lo que restringe su aplicación a longitudes de enlace relativamente cortas (LAN, redes domésticas, automóviles, aplicaciones en aeronáutica, etc.). En contrapartida, su gran tamaño y apertura permiten un mejor acoplo de luz con fuentes ópticas de bajo coste, dado que el núcleo posee el 96% de la sección transversal de la fibra. Además tienen sus ventanas de atenuación en la región del visible.

Existen muchos tipos de fibras de plástico, que se pueden clasificar en función de su perfil de índice, tamaño y de los materiales utilizados en su fabricación, aunque en este proyecto nos centramos en las fibras de perfil de salto de índice (SI-POF), de 1 mm de diámetro y de núcleo de polimetilmetacrilato (PMMA). Para describir este tipo de fibras, hay que tener en cuenta una serie de parámetros, que pueden clasificarse en dos grupos:

- *Parámetros estáticos:* características geométricas y ópticas como los diámetros del núcleo y la cubierta, apertura numérica o el perfil de índice de refracción. Son constantes a lo largo de la fibra.
- *Parámetros dinámicos:* son otras características relacionadas con la propagación de la señal a lo largo de la fibra. Entre ellas están, el patrón de campo lejano (*FFP*, *Far Field Pattern*), la atenuación y la dispersión.

Las que nos interesarán serán las del segundo grupo, que son las más importantes desde el punto de vista de las comunicaciones. Este proyecto se basa en la caracterización de curvaturas a partir de medidas de patrón de campo lejano mediante el modelo que se describe en el Anexo III.

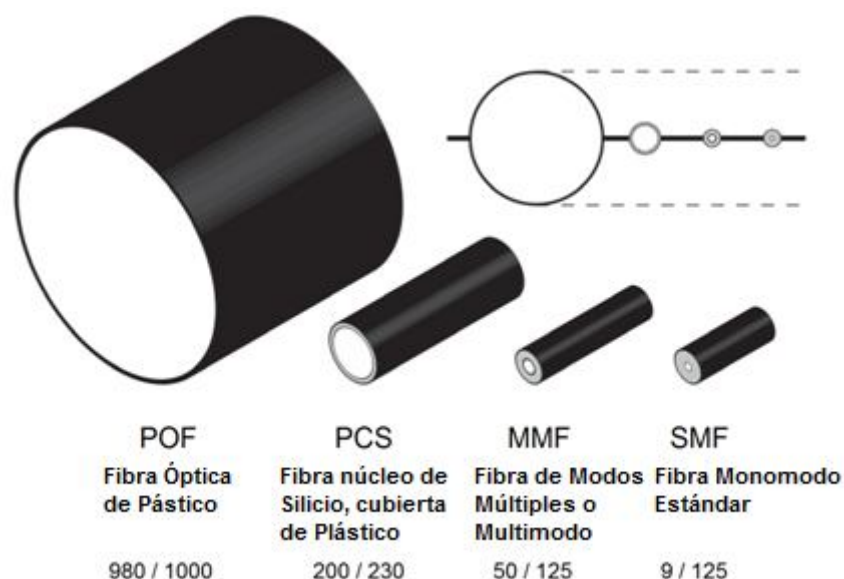


Figura I.1 Comparación de la dimensión de diferentes tipos de fibras ópticas.

I.1. Materiales utilizados en su fabricación

El material más utilizado para fabricar el núcleo de las POF es el termoplástico PMMA (polimetilmetacrilato o más conocido como Plexiglas®). La Figura I.2 muestra la estructura del monómero y de su polímero.

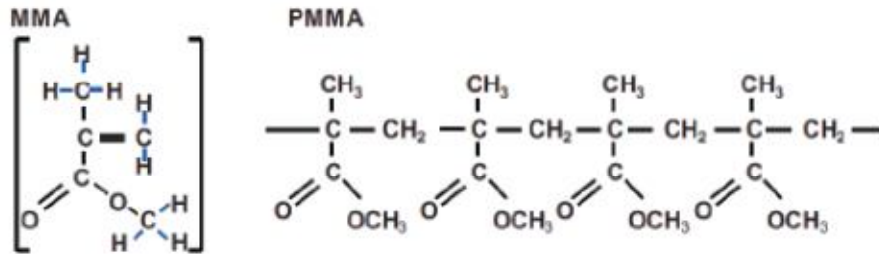


Figura I.2 Estructura atómica del PMMA.

El PMMA se produce a partir de etileno, ácido cianhídrico y alcohol metílico. Es resistente al agua, lejías, ácidos diluidos, gasolina, aceites minerales y aceite de trementina. El PMMA es un componente orgánico formado por largas cadenas cuyo típico peso molecular es 105. Lo esencial desde el punto de vista de la transparencia óptica del material es la estructura amorfa del material polimerizado. La densidad del PMMA es de 1.18 g/cm³. Su resistencia a la tracción es aproximadamente 7-8 kN/cm². El índice de refracción del PMMA es de 1.492 y la temperatura de transición del vidrio oscila entre 95 y 125°C. A temperatura ambiente y humedad relativa del 50%, el material puede absorber hasta 1.5% de agua, lo cual afecta a las características de atenuación.

Aparte de los materiales usados en el núcleo de la fibra, el material empleado para el recubrimiento también es importante, ya que tiene una contribución significativa en la resistencia térmica. Además, determina las propiedades mecánicas del cable, tales como la resistencia a la carga de compresión y la resistencia a la tracción, así como la flexibilidad y la longitud tensora. El uso de PVC (cloruro de polivinilo), PE (polietileno) o PA (poliamida) como materiales de recubrimiento típicos en aplicaciones de construcción permiten los máximos rangos de temperatura, que van desde los 70°C a los 90°C. En nuestro caso, el recubrimiento de las fibras utilizadas es de polietileno (PE).

I.2. Clasificación de las fibras de plástico

Según el índice de refracción del núcleo, las fibras ópticas pueden clasificarse en los diferentes tipos representados en la siguiente figura: SI-POF (Fibra de Salto de Índice), GI-POF (Fibra de Índice Gradual), MSI-POF (Fibra de Índice Multi-Escalón) y MC-POF (Fibra de Múltiples Núcleos).

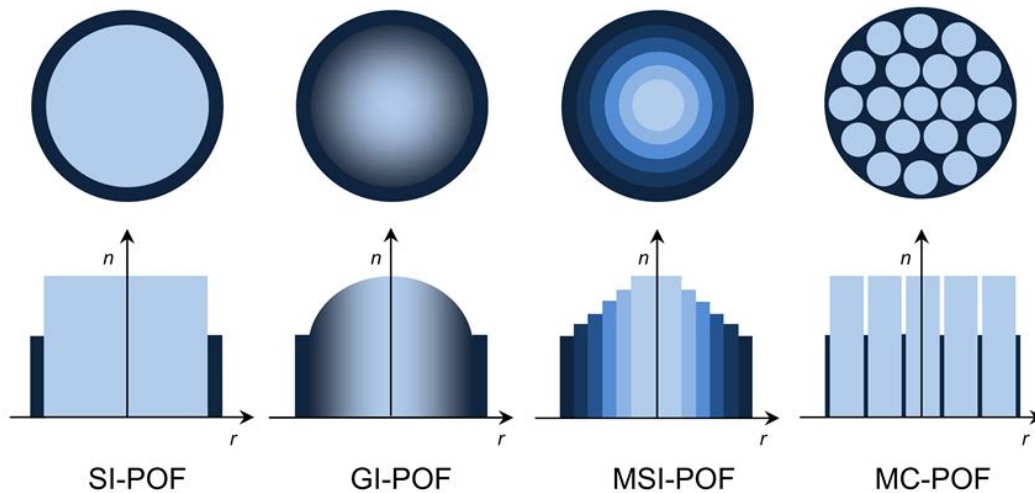


Figura I.3 Diferentes tipos de fibras ópticas de plástico.

- SI-POF (Fibra de Salto de Índice): esta es la utilizada en este proyecto, posee una cubierta siempre para cubrir un núcleo homogéneo.
- GI-POF (Fibra de Índice Gradual): el índice de refracción disminuye de forma continua como gradiente desde el centro del núcleo hasta el exterior, el más habitual es parábólico. Debido al continuo cambio del índice de refracción, los rayos no se propagan en línea recta, se refractan constantemente hacia el eje de la fibra y no exceden cierto ángulo evitando que dejen el núcleo sin haber reflexiones en la superficie de la interfaz. El índice de refracción es cada vez menor en regiones distantes al núcleo, con lo cual se consiguen mayores velocidades de propagación. Con estas fibras es posible obtener un mayor ancho de banda, con una combinación ideal de parámetros, las diferentes longitudes de recorrido y velocidades de propagación pueden cancelar los recorridos exteriores, así desaparece la dispersión modal consiguiendo aumentar dos o tres órdenes de magnitud el ancho de banda de la SI-POF. Los anchos de banda de 200 m de una fibra PMMA-GI-POF aumentan de 1 GHz a 4 GHz. Además, el acoplamiento modal es menos significativo en las GI que en las SI debido a que no hay reflexiones en la interfaz núcleo-cubierta.
- MSI-POF (Fibra de Índice Multi-Escalón): es una forma de realizar una aproximación a las GI-POF evitando los problemas tecnológicos de fabricarlas. El núcleo consiste en varias capas (de 4 a 7) que aproximan la curva parábólica con varios escalones. En este caso, los rayos no se propagan en caminos curvados continuamente, sino en caminos con múltiples difracciones como vemos en la siguiente figura:

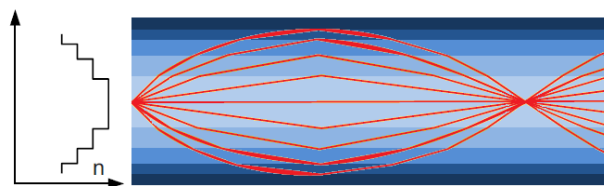


Figura I.4 Propagación en una fibra MSI-POF.

Con un número suficiente de escalones, la diferencia entre la GI-POF ideal y la MSI-POF será muy pequeña. En los estándares, GI y MSI se clasifican en la misma clase.

- **MC-POF (Fibra de Múltiples Núcleos):** Estas fibras están formadas por varios núcleos, el conjunto de ellos actúa como un único gran núcleo, de forma que se mantienen las ventajas de facilidad de manejo y acoplamiento de las POF. Los requerimientos de alto ancho de banda y baja sensibilidad a curvaturas es difícil de cumplir con una fibra de 1mm, cuanto mayor sea el cociente entre el radio de la curvatura y el radio del núcleo, menores serán las pérdidas, por ellos, estas fibras de múltiples núcleos tienen menores pérdidas por curvaturas que las de un solo núcleo. Además, también tienen las ventajas de su capacidad para transmitir imágenes utilizando los diferentes núcleos como si fueran píxeles, teniendo aplicaciones médicas (por ejemplo, en endoscopios), y de la mayor capacidad de transmisión en el caso de desear transmitir diferentes señales por cada uno de los núcleos utilizando técnicas de multiplexación por división espacial.

Cada una de las fibras individuales son perfectamente redondas y tienen su cubierta, se desaprovecha todo el espacio correspondiente a las cubiertas y el que hay entre las fibras, cuantas más fibras, mayor es el espacio desaprovechado. Una mejora de estas fibras para evitar este desaprovechamiento se produce si al fabricarlas, además de reducir el grosor de las cubiertas se les somete a grandes temperaturas para que cambien su forma redonda y se reduzcan los espacios entre fibras, sin que este cambio produzca modificación significativa en la propagación de la luz.

I.3. Características geométricas de la fibra óptica de plástico de salto de índice

Las fibras de plástico de salto de índice (SI-POF) fueron las primeras que se fabricaron, igual que ocurrió con las de vidrio, y siguen siendo muy utilizadas hoy en día. La medida estándar es de 1 mm de diámetro, que se refiere al núcleo o core, y están recubiertas por una cubierta o cladding simple y muy delgado que sirve para confinar la luz dentro del núcleo. Por eso el cable incluye siempre un material protector (recubrimiento o jacket) de materiales diversos según la aplicación. En la Figura I.5 se muestra la estructura con un corte transversal de la SI-POF y sus capas.



Figura I.5 Estructura de una SI-POF.

Para determinar la cantidad de luz de una fuente que puede acoplarse en una fibra son de interés las dimensiones de la fibra y su apertura numérica (NA).

En la Figura I.6 se representa el perfil del índice de refracción y la propagación de los rayos dentro de la fibra. Los índices de refracción de núcleo y cubierta determinan la apertura

numérica (NA) y con ello, el ángulo de aceptación. El índice de refracción del núcleo se toma siempre como 1.5, siendo éste el valor de la cubierta menor y dependiente del fabricante, que no suele facilitar su valor en las hojas de características. Todos los rayos que inciden con un ángulo mayor al del ángulo crítico se propagan por la fibra, reflejados en la interfaz núcleo-cubierta con un ángulo igual al de incidencia.

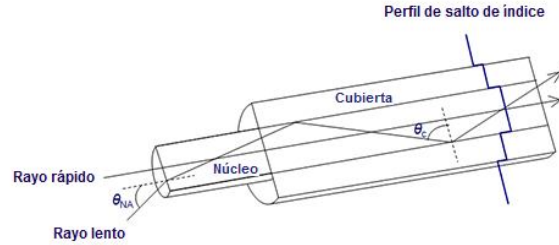


Figura I.6 Índice de refracción y propagación de rayos en la fibra.

El ángulo de aceptación (θ_{NA}) es el ángulo máximo con el que se debe incidir sobre el núcleo para que haya propagación de luz por la fibra. Está directamente relacionado con los índices de refracción del núcleo y de la cubierta, que determinan la NA y cumple la relación:

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cladding}^2} \quad [I.1]$$

Entonces la ecuación que proporciona el ángulo de aceptación para una determinada fibra es:

$$\theta_{NA} = \sin^{-1}(NA) \quad [I.2]$$

La NA típica de la POF es grande, siendo normalmente de 0.46 a 0.50. Una NA grande favorece el acoplamiento de luz, pero generalmente va en detrimento del ancho de banda de la fibra, con el que está inversamente relacionada. Esto ha motivado que se fabriquen fibras SI-POF con NA menores, que precisamente se conocen como fibras de ancho de banda mejorado, con valores de apertura numérica alrededor de 0.3 como algunos modelos PM de Raytela™ de Toray.

I.4. Atenuación

La potencia de luz transportada por una fibra óptica se atenúa durante su propagación. La luz es absorbida en diferente medida por el medio a través del que pasa y sufre scattering o difusión por ese medio o por la interfaz núcleo-cubierta. La reducción en potencia entre los dos extremos de un tramo de fibra se expresa en decibelios, y se obtiene de la siguiente relación:

$$\alpha = 10 \log_{10} \left(P_e / P_s \right) \quad [I.3]$$

Donde P_e y P_s son las potencias de entrada y salida respectivamente. La humedad y la temperatura cambian ligeramente el espectro de absorción. La atenuación también es sensible

a las condiciones de fabricación de la fibra, que puede hacer que varíen las pérdidas dentro de un mismo carrete. También influye el diámetro del núcleo de forma inversa, a mayor núcleo, menor atenuación.

Los mecanismos básicos que provocan pérdidas ópticas en la POF pueden clasificarse en dos grupos, *intrínsecos*, por la constitución de la fibra, y *extrínsecos*, debidos a causas como los procesos de fabricación, envejecimiento, tendido, etc.

- *Pérdidas intrínsecas*: Dependen principalmente del material del que se compone la fibra y no pueden reducirse sin cambios drásticos en su composición. Estas pérdidas suelen ser de dos tipos: pérdidas por absorción o pérdidas por scattering. El mecanismo de absorción se debe a la interacción existente entre los fotones que viajan por la fibra y las moléculas que componen el núcleo (Carbono-Hidrógeno). La absorción de las vibraciones modales es más intensa en los primeros armónicos y provoca un fuerte acoplo modal, y la consecuente reducción del ancho de banda. Esto explica la alta atenuación de la POF en las zonas del espectro del infrarrojo y el rojo. El scattering de Rayleigh es un fenómeno de difusión que se produce cuando la luz encuentra en su camino partículas extrañas (fluctuaciones de densidad, orientación y/o composición), cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda de la señal. En la POF, en las zonas del visible y del infrarrojo es más bajo este scattering, mientras que es predominante en las fibras de vidrio. El scattering dominante en las fibras de plástico es el *Mie* que se produce por choques con partículas de mayor tamaño que Rayleigh.
- *Pérdidas extrínsecas*: Están relacionadas con el procesado del material y la fabricación de la fibra y por lo tanto pueden reducirse perfeccionando estos procedimientos. Incluyen pérdidas debidas a impurezas en la fibra como polvo o micropartículas, o a imperfecciones en la estructura de la fibra como microcurvaturas, microfracturas o burbujas, así como también las pérdidas procedentes al tendido de la fibra.

En la Figura I.7 se muestra el espectro de atenuación de fibras con núcleos de PMMA de SI y GI. Se tienen ventanas de pérdidas localizadas en torno a 570, 650 y 780 nm entre los máximos de absorción debidos a armónicos de las vibraciones de los enlaces C-H.

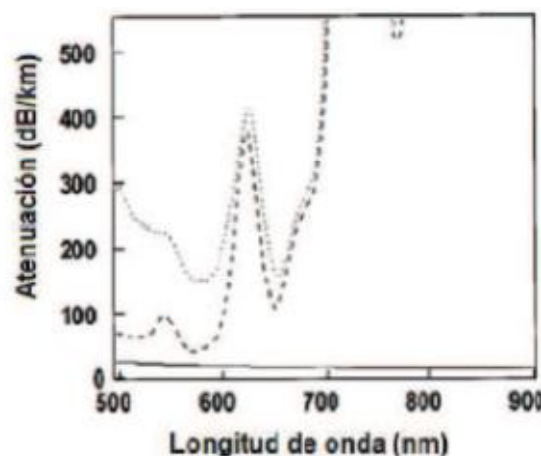


Figura I.7 Espectros de atenuación de fibras de PMMA-POF: SI (líneas discontinuas), GI(puntos discontinuos).

La POF de salto de índice (SI-POF) muestra que la mejor ventana está situada en torno a los 570 nm, con una atenuación por debajo de 0.1 dB/m. Sin embargo, los diodos LED más eficientes y baratos se fabrican en la región del rojo (650 a 660 nm), donde la atenuación es algo mayor, 0.15 dB/m, encontrándose el límite teórico en 0.106 dB/m. La POF de índice gradual (GI-POF) tiene unas pérdidas algo mayores, 0.16 dB/m a 650 nm relacionado con el dopante utilizado para formar el perfil gradual. Hay que tener en cuenta que la atenuación depende de la apertura numérica de la luz inyectada, ya que es diferente para los distintos modos (ángulos). Los valores citados, referidos a fuentes colimadas monocromáticas pueden aumentar incluso en 0.1 dB/m con luz Lambertiana con anchura espectral de 120 nm.

I.5. Dispersión y ancho de banda

La capacidad de la fibra óptica de plástico para transmitir elevadas tasas de datos es una de las características que la pueden hacer especialmente valiosa a la hora de sustituir al cableado tradicional en redes LAN y otras aplicaciones con distancias cortas de enlace. Por tanto, es importante conocer los mecanismos físicos que limitan el ancho de banda de la POF: la dispersión temporal.

La velocidad de transmisión viene limitada por esta dispersión temporal, cuyas causas son las características dispersivas de la fibra, lo que provoca ensanchamiento de los pulsos a medida que se propagan, deformándolos, acarreando errores que, en definitiva, provocan fallos en recepción que perjudica la comunicación. Existen fundamentalmente dos tipos de dispersión que afectan a la POF: dispersión material, debida a la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda, y la dispersión intermodal, propias de las fibras multimodo. Este segundo tipo es el que predomina en las fibras de plástico PMMA, debido al gran número de modos que se propagan por ellas. La dispersión guía de onda es prácticamente insignificante para fibras multimodo como las POF.

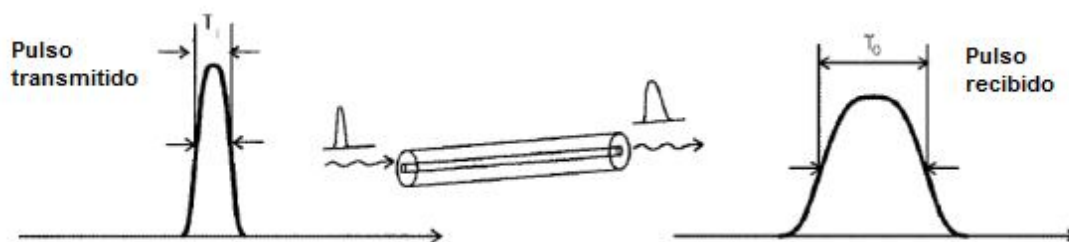


Figura I.8 Efecto de la dispersión en la fibra.

- *Dispersión material:* Dado que la anchura espectral del emisor no es nula y que a cada longitud de onda le corresponde una velocidad de propagación, se producirá un ensanchamiento de los pulsos que será proporcional a la distancia de propagación. Aunque con SI-POF se utilizan fuentes de gran anchura espectral, como LEDs, este tipo de dispersión es despreciable frente a la intermodal que es predominante en fibras de

perfil de salto de índice. Por otra parte, en fibras de índice gradual, con baja dispersión modal, la dispersión cromática puede ser importante.

- *Dispersión intermodal*: El número de modos que se propagan en las fibras de plástico es del orden de un millón, mucho mayor que en las fibras multimodo de vidrio. Además, debido a la fuerte difusión de los materiales plásticos las interacciones entre modos son también mucho más fuertes dando lugar a transferencia de potencia entre modos o acoplo modal. Esto viene agravado por el hecho de que las fuentes utilizadas suelen ser de gran apertura e inyectan luz en la mayor parte de los modos. Por ello, la capacidad de las fibras de plástico para transmitir información está fuertemente condicionada por factores espaciales como la apertura de la fuente y se ve afectada por perturbaciones externas que afectan a la distribución modal como curvaturas, presiones, etc.

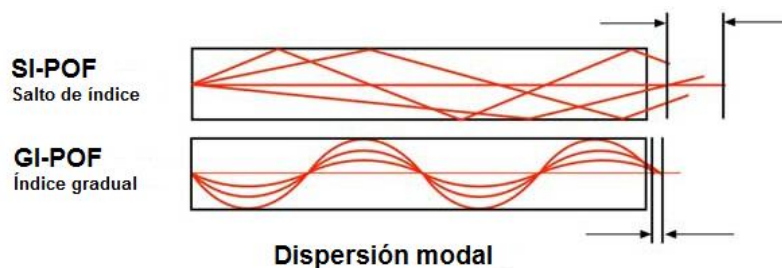


Figura I.9 Diferencia de caminos entre rayos dentro del núcleo en SI-POF y GI-POF.

En la Figura I.9 se observan las diferentes direcciones que pueden tomar los rayos dentro del núcleo las fibras de plástico de salto de índice y de gradiente de índice. Para reducir la limitación procedente de la dispersión intermodal, se propone la fabricación de POF con núcleo de índice gradual, con el que se equilibran las velocidades de propagación de los diferentes modos, tal como se observa, permitiendo tasas de Gb/s en las mismas distancias.

La capacidad de transmitir información suele cuantificarse mediante el ancho de banda. La definición más habitual es la que describe la Figura I.10, el ancho de banda a 3 dB. Así, f_{3dB} es la frecuencia a la cual la amplitud de una señal sinusoidal modulada monocromáticamente es reducida $\frac{1}{2}$ del nivel óptico. En sistemas basados en SI-POF de 1 mm, el factor que limita su ancho de banda es fundamentalmente la dispersión intermodal de la fibra que depende de diferentes factores como la longitud de fibra, la forma de inyección, y la presencia de perturbaciones como por ejemplo curvaturas o presiones.

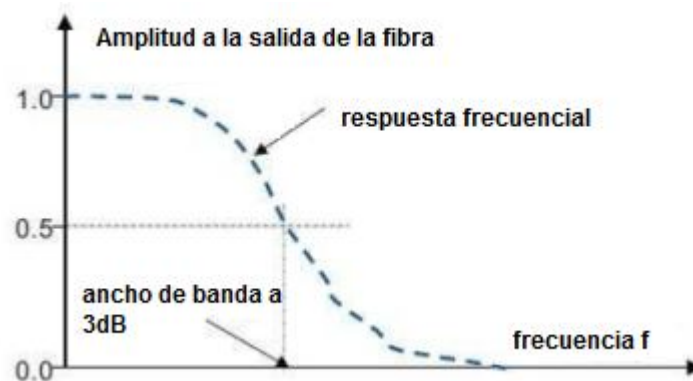


Figura I.10 Definición de ancho de banda.

Anexo II: PROCESO DE PREPARACIÓN DE LA FIBRA

Para asegurarnos de que tenemos el máximo de señal a la salida de la fibra y que no tenemos pérdidas adicionales que interfieran en los resultados, es necesario preparar los extremos de la fibra, cortando y puliendo dichos extremos, así como colocarlos bien centrados para que la inyección y la salida de luz sean óptimas. Este proceso es vital durante el protocolo de medida ya que de él depende que las medidas realizadas sean correctas.

1) *Corte y pelado de la fibra*: Al contrario que en las fibras de vidrio, primero se realiza el corte de la fibra, éste será mejor cuanto más perpendicular al eje de la fibra se realice. Después se quita la cubierta de los extremos para poder introducirlos en los conectores que sirven de posicionadores.

Teniendo en cuenta estudios realizados anteriormente [19], se eligen las herramientas de corte y pelado adecuadas para el tipo de fibra que se está utilizando. En el caso de la fibra GH se utiliza la cortadora tipo *Fiber Cutter* [23]. Se trata de una cortadora para fibra de plástico simple y doble de 1.5 y 2 mm con cubierta con la que el número de cortes fiables con cada cuchilla está limitado. La peladora elegida es la *Micro-Strip™ precisión stripper* [24]. Ambas herramientas se muestran en la Figura II.1 que hay a continuación.



Figura II.1 Cortadora y peladora empleadas.

2) *Pulido de los extremos*: Para mejorar las terminaciones y que éstas produzcan las menores pérdidas posibles, se efectúa un pulido.

El proceso se lleva a cabo con dos lijados (*Kit IF CPK*), el primero con una lija de grano duro (papel de pulir 2000-grit) y el segundo con otra de grano fino ($3\mu\text{m}$) [25]. Para facilitar el lijado se emplea un líquido especial [26] y un disco de plástico a modo de base para colocar la fibra de forma que esté perpendicular a la lija [27]. Un lijado adecuado requiere realizar 30 movimientos en forma de “8” con cada una de las lijas tal y como se observa en la Figura II.2, de esta manera se intenta que la fibra se vaya puliendo de forma homogénea en toda la superficie. Este proceso se repite hasta que el pulido sea el adecuado.